



**Humberto Miranda
Ribau**

**Soldadura laser pulsado Nd:YAG entre metais
dissimilares**



**Humberto Miranda
Ribau**

**Soldadura laser pulsado Nd:YAG entre metais
dissimilares**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Xin Xue, Investigador do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva

professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

orientador

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero, desde já, demonstrar a minha gratidão para com todos os que de algum modo, direta ou indiretamente, me ajudaram a realizar esta dissertação.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor António Manuel de Bastos Pereira, pela forma incansável como me explicou, ensinou e transmitiu o conhecimento que possui.

Ao Engenheiro Ricardo Beja, por toda a disponibilidade e apoio que deu para a realização dos ensaios de tração.

Ao Engenheiro António Festas, pelo apoio técnico fornecido nos trabalhos da oficina.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família e também aos meus amigos mais chegados. Por terem sido e continuarem a ser a minha força.

palavras-chave

soldadura, laser, aço *dual-phase*, liga de alumínio, liga de titânio

resumo

A presente investigação consiste no estudo experimental das propriedades mecânicas induzidas pela soldadura laser em chapas de materiais metálicos dissimilares, nomeadamente, aço de alta resistência *dual-phase* (DP) 600 com aço de alta resistência *dual-phase* (DP) 1000 e liga de alumínio AA6060-T6 com liga de titânio Ti-6Al-4V.

No caso dos aços *dual-phase*, o estudo foi realizado em amostras de 0,8 mm de espessura, numa junta do tipo topo a topo. Após a seleção dos parâmetros mais adequados para a soldadura, foram efetuados ensaios de tração aos provetes soldados, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas e avaliar a influência dos parâmetros do laser.

Em relação à ligação de alumínio com titânio, esta foi feita numa junta de sobreposição dupla em amostras de 1,9 e 0,9 mm de espessura, respetivamente. Do mesmo modo que os aços, foram também variados os parâmetros do laser, de modo a se obter os mais adequados, para posteriormente se efetuar ensaios de tração. Variou-se também o sítio onde o feixe laser incide na junta de sobreposição para melhor avaliar a soldadura.

keywords

welding, laser, dual-phase steel, aluminium alloy, titanium alloy

abstract

The aim of this thesis consists of an experimental study of the mechanical properties induced by the laser welding in dissimilar metal, namely, dual-phase steel 600 with dual-phase steel 1000 and aluminium alloy AA6060-T6 with titanium alloy Ti-6Al-4V.

In the case of the dual-phase steels, the study was carried out on 0,8 mm plates, in a butt joint type. After selecting the most appropriate parameters for the welding, tensile tests were performed on welded specimens with the purpose to find the mechanical properties and evaluate the influence of the laser parameters.

The aluminium - titanium union was accomplished on a double-lap joint on 1,9 mm and 0,9 mm plates, respectively. Just like the situation of the steels, the laser parameters were too varied with aim to obtain the most appropriate parameters, to later perform tensile tests. It was also changed the place where the laser beam impacts on the specimen, to better analyse the welding.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do documento	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Laser	3
2.1.1	História do laser	3
2.1.2	Propriedades do laser	4
2.1.3	Composição do sistema laser	5
2.1.4	Princípio de funcionamento	6
2.1.5	Tipos de laser	8
2.1.5.1	Lasers de estado sólido	8
2.2	Soldadura	9
2.2.1	Modos de soldadura laser	10
2.2.2	Defeitos de soldadura	11
2.2.3	Parâmetros de soldadura	13
2.3	Aços avançados de alta resistência	13
2.3.1	Aços dual-phase	15
2.3.1.1	Processamento do aço	16
2.3.1.2	Aplicações	16
2.3.1.3	Propriedades do aço DP600 e DP1000	18
2.4	Alumínio	19
2.4.1	Classificação das ligas de alumínio	19
2.4.2	Liga de alumínio AA6060 T6	21
2.5	Titânio	22
2.5.1	Classificação das ligas de titânio	22
2.5.2	Liga de titânio Ti-6Al-4V	23
3	Procedimento experimental	25
3.1	Estação de trabalho	25
3.2	Dispositivo de fixação	28
3.3	Parâmetros do laser	32
3.4	Soldadura DP600 – DP1000	33
3.4.1	Preparação das amostras	33
3.4.2	Soldadura	36

3.4.3	Maquinagem dos provetes.....	36
3.4.4	Ensaio de tração	37
3.4.4.1	ARAMIS.....	40
3.5	Soldadura alumínio – titânio	41
3.5.1	Preparação das amostras	41
3.5.2	Soldadura.....	44
3.5.3	Ensaio de tração	45
4	Resultados	48
4.1	Soldadura DP600 - DP1000.....	48
4.1.1	Ensaio de tração	51
4.1.1.1	Aramis.....	62
4.2	Soldadura Alumínio - Titânio	67
4.2.1	Alumínio AA6060	67
4.2.2	Ensaio preliminar	68
4.2.2.1	Soldadura a meio da interseção da junta	68
4.2.2.2	Soldadura no início do titânio	77
4.2.2.3	Soldadura no início do alumínio	83
4.2.2.4	Valores máximos de força	89
4.2.3	Verificação dos melhores resultados	89
4.2.3.1	Amostra 5	90
4.2.3.2	Amostra 11	91
4.2.3.3	Amostra 12	92
5	Conclusões e trabalhos futuros	94
	Bibliografia	96

Lista de Figuras

Figura 1 – Theodore Maiman	4
Figura 2 – Primeiro laser	4
Figura 3 - Feixe de luz de uma lanterna com uma lâmpada incandescente (cima) e de um laser (baixo)	5
Figura 4 – Composição do sistema laser	5
Figura 5 – Representação de um átomo	6
Figura 6 – Representação esquemática das três etapas de criação do feixe laser	7
Figura 7 – Representação esquemática dos lasers Nd:YAG	9
Figura 8 – Representação esquemática dos diferentes tipos de soldadura laser	10
Figura 9 – Representação esquemática do princípio de soldadura por condução	10
Figura 10 – Representação esquemática da soldadura laser por keyhole	11
Figura 11 – Representação esquemática dos fenómenos metalúrgicos que ocorrem durante a soldadura	12
Figura 12 – Representação da zona termicamente afetada	12
Figura 13 – Defeitos internos de soldadura	13
Figura 14 – Diferentes tipos de aços	14
Figura 15 – Fotografia ao microscópio da microestrutura de um aço dual-phase	15
Figura 16 – Representação esquemática da produção do aço dual-phase	16
Figura 17 – Crescimento dos aços de alta resistência na indústria automóvel	17
Figura 18 – SISMA SWA300	25
Figura 19 – Joystick da máquina laser	26
Figura 20 – Eixos da máquina laser	27
Figura 21 – Ecrã tátil	27
Figura 22 – Parâmetros do laser	28
Figura 23 – Dispositivo de fixação de provetes	28
Figura 24 – Bocal do gás na posição inicial e final	30
Figura 25 – Furos responsáveis pela canalização do gás (vista em corte) [8]	30
Figura 26 – Caixa para criar atmosfera rica em argon	31
Figura 27 – Soldadura laser (partes superior (a) e inferior (b)) sem a caixa	31
Figura 28 – Soldadura laser (partes superior (a) e inferior (b)) com a caixa	31
Figura 29 – Dimensões das amostras dos aços dual-phase	33
Figura 30 – Guilhotina Guifil	33
Figura 31 – Amostras de aço dual-phase soldadas topo a topo	34
Figura 32 – Esquema de corte por guilhotina	34

Figura 33 – Superfície típica de uma peça cortada por guilhotina	35
Figura 34 – Fresadora CNC MIKRON VCE 500.....	35
Figura 35 – Dimensões do provete segunda a norma ISSO 6892-1:2009	36
Figura 36 - Shimadzu AGX 100 kN.....	37
Figura 37 – Curva tensão - deformação	38
Figura 38 – Pontos de medição do provete.....	39
Figura 39 - Videoextensómetro da Shimadzu AGX 100 kN	39
Figura 40 – Provete preparado para ensaio ARAMIS.....	40
Figura 41 - Setup das camaras: 1 - provete, 2 - fontes de luz, 3 - camaras, 4 - laser.....	41
Figura 42 - Perfil industrial de alumínio	42
Figura 43 - Serrote KASTO	42
Figura 44 - Broca ARNO de metal duro	43
Figura 45 – Amostra de alumínio.....	43
Figura 46 – Amostra de titânio	43
Figura 47 – Encaixe das amostras de alumínio e titânio	44
Figura 48 - Soldadura a meio da interseção	44
Figura 49 - Soldadura no início do titânio	44
Figura 50 - Soldadura no início do alumínio	44
Figura 51 - Shimadzu AGX 10 kN.....	46
Figura 52 - Forno de tratamento térmico Termolab.....	47
Figura 53 – Resumo dos valores da tensão real	61
Figura 54 – Resumo dos valores da deformação real	61
Figura 55 - Representação da deformação real ao longo comprimento, ϵ_y	62
Figura 56 - Representação da deformação real ao longo da largura, ϵ_x	62
Figura 57 - Divisão do provete em 3 zonas de análise	63
Figura 58 - Deformações reais na zona C ao longo do tempo	64
Figura 59 - Deformações reais na zona A ao longo do tempo.....	64
Figura 60 - Deformações reais ao longo do tempo na zona B.....	65
Figura 61 - Tensão real em função da deformação real na zona A.....	65
Figura 62 - Tensão real em função da deformação real na zona B.....	66
Figura 63 - Tensão real em função da deformação real na zona C.....	66
Figura 64 - Tensão real - deformação real de AA6060.....	67
Figura 65 - Valores das forças máximas obtidas nos ensaios de tração Al - Ti.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de laser	8
Tabela 2 - Aplicações dos aços dual-phase na indústria automóvel	17
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço DP600	18
Tabela 4 – Composição química do aço DP600	18
Tabela 5 – Propriedades mecânicas DP1000.....	18
Tabela 6 – Composição química DP1000	18
Tabela 7 – Designação numérica das ligas de alumínio	20
Tabela 8 – Designação dos tratamentos nas ligas de alumínio	20
Tabela 9 - Propriedades mecânicas da liga AA6060 T6.....	21
Tabela 10 - Composição química da liga AA6060 T6	21
Tabela 11 – Ligas de titânio	23
Tabela 12 - Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V	24
Tabela 13 - Composição química da liga Ti-6Al-4V	24
Tabela 14 – Características do laser SISMA SWA300.....	26
Tabela 15 – Funcionamento do dispositivo de fixação [8]	29
Tabela 16 – Parâmetros de soldadura para os aços dual-phase	36
Tabela 17 – Amostras maquinadas	37
Tabela 18 – Parâmetros de soldadura para o par alumínio - titânio	45
Tabela 19 - Resultados da soldadura nos aços dual-phase	48
Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração da amostra de DP1000.....	51
Tabela 21 - Resultados do ensaio de tração da amostra de DP600.....	52
Tabela 22 – Resultados do ensaio de tração da amostra 1	53
Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração da amostra 2	54
Tabela 24 – Resultados do ensaio de tração da amostra 3	55
Tabela 25 – Resultados do ensaio de tração da amostra 4	56
Tabela 26 – Resultados do ensaio de tração da amostra 5	57
Tabela 27 – Resultados do ensaio de tração da amostra 6	58
Tabela 28 – Resultados do ensaio de tração da amostra 7	59
Tabela 29 – Resultados do ensaio de tração da amostra 8	60
Tabela 30 - Resultados da amostra 5	69
Tabela 31 - Resultados da amostra 5	69
Tabela 32 - Resultados da amostra 6	71
Tabela 33 - Resultados da amostra 6	71
Tabela 34 - Resultados da amostra 7	73

Tabela 35 - Resultados da amostra 7	73
Tabela 36 - Resultados da amostra 8	75
Tabela 37 - Resultados da amostra 8	75
Tabela 38 - Resultados da amostra 9	77
Tabela 39 - Resultados da amostra 9	77
Tabela 40 - Resultados da amostra 10	79
Tabela 41 - Resultados da amostra 10	79
Tabela 42 - Resultados da repetição da amostra 10.....	80
Tabela 43 - Resultados da amostra 11	81
Tabela 44 - Resultados da amostra 11	81
Tabela 45 - Resultados da amostra 12	83
Tabela 46 - Resultados da amostra 12	83
Tabela 47 - Resultados da amostra 13	85
Tabela 48 - Resultados da amostra 13	85
Tabela 49 - Resultados da amostra 14	87
Tabela 50 - Resultados da amostra 14	87
Tabela 51 - Resultados do ensaio de tração da amostra 5.....	90
Tabela 52 - Resultados do ensaio de tração da amostra 11.....	91
Tabela 53 - Resultados do ensaio de tração da amostra 12.....	92

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A capacidade de fabricar um produto usando diferentes metais e ligas aumenta consideravelmente a flexibilidade de um projeto e da produção. Esta combinação de materiais visa a otimização do produto final, combinando diferentes propriedades tais como a força, a massa volumica, o desgaste, a resistência à corrosão, etc. Por exemplo, materiais caros com propriedades específicas podem ser usados em locais críticos, unidos a materiais mais baratos que servem para fazer suporte ou conectar. Estas uniões de metais dissimilares são particularmente usadas em componentes das indústrias de geração de energia, química, petroquímica, nuclear, eletrónica, aeronáutica e automóvel. Contudo, estas junções são um desafio para a engenharia devido à diferença das propriedades físicas e químicas de cada material [1].

O desenvolvimento de estruturas mais leves tem sido bastante requerido nas indústrias automóvel e aeronáutica com o objetivo de se poupar materiais e recursos naturais e deste modo desenvolver soluções menos poluentes. Na aeronáutica, algumas estruturas híbridas com metais dissimilares, como Ti e Al, Fe e Al, Mg e Al têm sido consideradas efetivas de modo a reduzir o peso das estruturas e a poupar metais raros. A estrutura híbrida constituída por Ti e Al já foi usada em asas de aviões, onde a placa de liga de titânio e a estrutura em forma de favos de mel de alumínio são unidos [2]–[4]. No caso da indústria automóvel destacam-se os aços de alta resistência, com uma combinação de boa resistência mecânica e ductilidade. Deste modo, torna-se também interessante o uso de estruturas híbridas compostas por diferentes aços de alta resistência, consoante os requisitos.

A soldadura laser é uma das mais recentes tecnologias de soldadura disponíveis na indústria. Com esta tecnologia é possível atingir resultados difíceis ou mesmo impossíveis de obter por outros processos de soldadura. A indústria automóvel, por exemplo, tem vindo a utilizar a soldadura laser para a fixação dos painéis nas estruturas dos automóveis como alternativa à soldadura por pontos. Isto deve-se ao facto de o laser ser capaz de produzir soldaduras de menores dimensões, com maiores penetrações de soldadura e também por só necessitar de ter acesso a um dos lados da peça a soldar. A utilização de soldadura laser proporciona ainda um aumento da resistência estrutural e tem capacidade de ser usada para a soldadura a altas velocidades [5].

O departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro adquiriu recentemente uma máquina de soldadura laser, SISMA SWA300, pelo que, dado o conhecimento embrionário na

soldadura laser de metais dissimilares, considerou-se interessante desenvolver uma investigação de maneira a adquirir mais conhecimento neste setor.

A presente investigação consiste no estudo experimental das propriedades mecânicas induzidas pela soldadura laser em chapas de materiais metálicos dissimilares, nomeadamente, aço de alta resistência *dual-phase* (DP) 600 com aço de alta resistência *dual-phase* (DP) 1000 e liga de alumínio AA6060-T6 com liga de titânio Ti-6Al-4V.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste na otimização dos parâmetros de soldadura de um laser pulsado Nd:YAG no par de metais dissimilares DP600 e DP1000 e no par alumínio AA6060-T6 e titânio Ti-6Al-4V.

O trabalho experimental foi realizado na máquina de soldadura laser SISMA SWA300 existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

1.3 Organização do documento

Este documento está organizado em seis capítulos e vários subcapítulos, com vista a facilitar a leitura e compreensão do mesmo. Os capítulos podem ser resumidos da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução
Neste capítulo apresenta-se o enquadramento desta investigação, os objetivos e a organização do documento.
- Capítulo 2 - Revisão bibliográfica
Este capítulo visa elaborar uma revisão bibliográfica sobre os princípios de funcionamento inerentes à tecnologia laser e às suas características. Aborda também alguma informação acerca dos metais usados neste trabalho.
- Capítulo 3 - Procedimento experimental
Neste capítulo pretende-se fazer a descrição de todo o procedimento experimental, bem como indicar a metodologia adotada para cumprir os objetivos.
- Capítulo 4 - Resultados
Este capítulo é dedicado à exposição dos resultados obtidos resultantes dos testes efetuados.
- Capítulo 5 - Conclusões e trabalho futuro
As conclusões são apresentadas e discutidas neste capítulo, bem como algumas sugestões que visam melhorar e desenvolver a investigação atual.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Laser

2.1.1 História do laser

Em 1704, Isaac Newton descreveu a luz como sendo uma corrente de partículas. Mais tarde, em 1803, Young, com a descoberta da polaridade da luz, identificou o comportamento ondulatório da mesma. Em 1905, Albert Einstein lançou o conceito de quanta, no qual defende que a luz é composta por partículas individuais e que estas possuem uma quantidade discreta de energia. Atualmente essas partículas são denominadas fótons. Maxwell caracterizou a luz como sendo uma vibração rápida de um campo eletromagnético devido às oscilações das partículas. Aquando da descoberta do fenómeno da radiação do corpo negro, no início do século XX, a teoria de Maxwell foi descartada. Esta teoria, publicada por Max Planck em 1900, defendia que a luz era uma forma de radiação eletromagnética. Sem este princípio, o laser nunca teria sido inventado [6]–[8].

Em 1917 Albert Einstein explicou a teoria da emissão estimulada, que se viria a tornar a base do funcionamento laser. Ele postulou que caso fosse possível uma inversão da população entre os níveis superior e inferior no sistema atómico, seria possível amplificar uma emissão estimulada em que esta teria a mesma frequência e fase da radiação incidente. Contudo, só no início da década de 1950 é que os cientistas e engenheiros conseguiram desenvolver mecanismos baseados no princípio da radiação estimulada, destacando-se Charles Townes, Joseph Weber, Alexander Prokhorov e Nikolai Basov [9].

Nesta altura, cientistas e engenheiros trabalhavam na criação de um MASER (*Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), um dispositivo capaz de amplificar micro-ondas com aplicação em sistemas de comunicação micro-ondas. Townes e outros engenheiros acreditavam que seria possível criar um *maser* ótico, um dispositivo capaz de gerar de feixes de luz poderosos através de energia de alta frequência. Apesar de todo o trabalho pioneiro, foi Theodore Maiman (Figura 1), em 1960, que inventou o primeiro laser, de rubi, com o nome LOSER (*Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*) (Figura 2). Este laser, que funcionava de forma pulsada, era em estado sólido e emitia uma luz de cor vermelha. Mais tarde, devido ao significado da palavra *loser* na língua inglesa, o nome foi modificado para LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [6], [9].

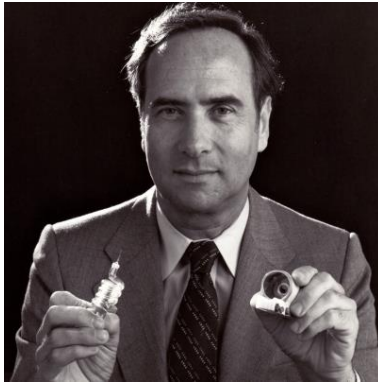


Figura 1 – Theodore Maiman [44]

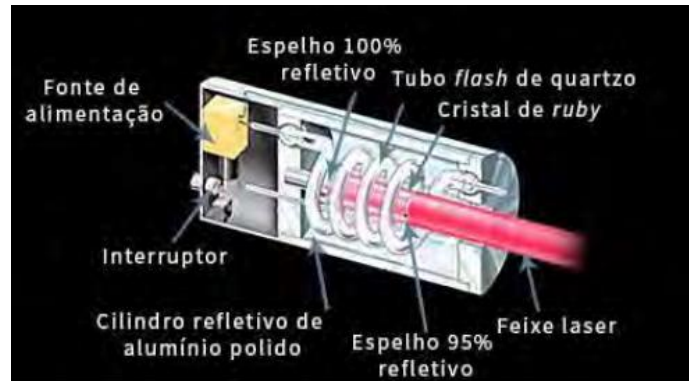


Figura 2 – Primeiro laser [45]

O desenvolvimento do laser foi um notável avanço tecnológico e um ponto crucial na história da ciência e engenharia. Em apenas seis anos após a invenção de Maiman, vários grupos de investigadores construíram protótipos, todos eles funcionais, de lasers a gás, sólidos, gasosos e semicondutores, baseando-se no sucesso de Maiman. No final dessa década, centenas de materiais foram descobertos, atuando como meio ativo do laser, capazes de amplificar a luz [10].

De entre as inúmeras vantagens das máquinas laser, podem-se nomear as seguintes como as mais interessantes [11]:

- Sem contacto: os lasers não tocam mecanicamente na peça de trabalho;
- Alta precisão: os lasers conseguem reproduzir contornos de elevada precisão;
- Aquecimento local: a zona termicamente afetada é muito reduzida;
- Flexibilidade: uma enorme variedade de formas e contornos podem ser feitos com uma única ferramenta;
- Acessibilidade: Acesso por um só lado da junta, facto que é uma enorme vantagem quando comparado com a soldadura por resistência.

Todas estas características fazem com que a velocidade de produção aumente, crescendo a produtividade e compensando o investimento em tecnologias laser. São estas características que fazem com o que o laser seja competitivo face às tecnologias convencionais.

2.1.2 Propriedades do laser

O que diferencia os lasers de outros tipos de fontes de luz, como por exemplo uma lâmpada incandescente, é a forma como a luz do laser é gerada (Figura 3). E a forma como a luz é criada no laser é o que lhe confere as suas propriedades com inúmeras áreas de aplicação.

Ao contrário da luz do sol, por exemplo, em que a luz é irradiada em todas as direções e com os comprimentos de onda diferentes e desfasados entre si, o feixe laser é [11]:

- Monocromático: todas as ondas de luz têm o mesmo comprimento de onda;
- Coerente: todas as ondas de luz estão em fase, produzindo um feixe de luz contínuo;

- Direcional: todas as ondas de luz têm exatamente a mesma direção;

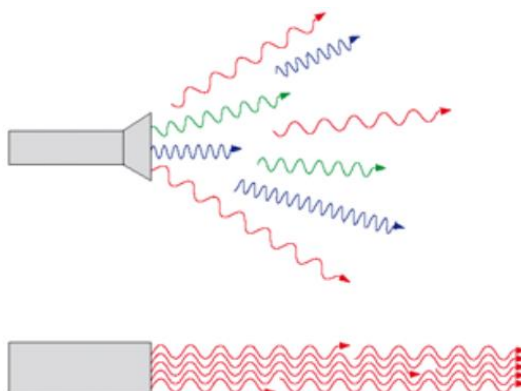


Figura 3 - Feixe de luz de uma lanterna com uma lâmpada incandescente (cima) e de um laser (baixo) [11]

Esta última propriedade é especialmente importante para o processamento de materiais. Como as ondas de luz têm a mesma direção, é possível criar um feixe de luz compacto que contenha muita densidade de potência. Este feixe pode ser conduzido por longas distâncias e pode ser aplicado no material com um foco de diâmetro muito pequeno, aumentando drasticamente a densidade de potência aplicada naquele local. A densidade de potência (W/mm^2) do feixe de um laser é 10^7 vezes mais elevada do que numa lâmpada incandescente [11].

2.1.3 Composição do sistema laser

Apesar dos mais variados tipos de laser, todos obedecem aos mesmos princípios físicos para gerar o feixe laser. A Figura 4 abaixo representa os principais constituintes responsáveis pela sua origem.



Figura 4 – Composição do sistema laser [46]

O meio ativo é a substância onde os fótons oscilam e a luz laser é produzida e amplificada. Esta substância pode ser um gás, líquido ou sólido, desde que, quando excitadas, estas substâncias emitam radiação em forma de ondas de luz [11].

Para que o meio possa emitir luz, é necessário fornecer-lhe energia de maneira a excitá-lo. Esta fonte de excitação pode ser por processos óticos, elétricos ou químicos, dependendo do meio ativo utilizado [11].

A cavidade ressonante consiste em dois espelhos com índices de refletividade diferentes, paralelos entre si, a formarem um oscilador ótico que funciona como cavidade através da qual a luz se vai deslocar. Cada vez que esta passa pelo meio ativo, é amplificada a sua potência. Um dos espelhos é totalmente impermeável e reflete todos os fotões. O outro é parcialmente permeável e permite que parte dos fotões o atravessem, formando o feixe laser [11].

Uma grande parte da energia excitada não é convertida em luz, mas sim em calor. Deste modo, é necessário um sistema de arrefecimento para não sobreaquecer o meio ativo e a cavidade ressonante, permitindo ao laser trabalhar continuamente [11].

2.1.4 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento da tecnologia laser baseia-se em conceitos de física atômica.

Um átomo consiste num núcleo central de carga elétrica positiva envolto por uma nuvem de eletrões de carga negativa. O núcleo atômico é composto por neutrões e prótons [8]. A Figura 5 mostra uma representação esquemática da estrutura do átomo.

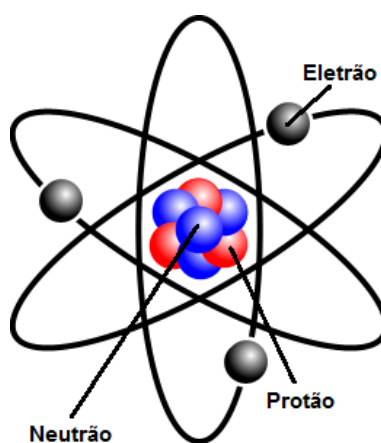


Figura 5 – Representação de um átomo [47]

Quando se fornece energia a um átomo, os eletrões procuram novas posições para ficarem em equilíbrio. Isto pode corresponder à passagem para uma órbita superior com maior energia. Após a chegada a esse ponto, o eletrão tenta voltar para o seu estado fundamental. É nesta altura que são libertados fotões, que não são mais que a energia absorvida pelo eletrão descarregada sob a forma de fotões [7].

A criação de um feixe laser consiste essencialmente em três etapas que ocorrem quase instantaneamente. Estas etapas são:

- I. A fonte fornece energia para o meio ativo, excitando os átomos de tal forma que os elétrons são elevados temporariamente para estados de energia mais altos. Como os elétrons não podem permanecer lá indefinidamente, são forçados a descer para um nível de energia mais baixo. Neste processo, o elétron perde o excesso de energia obtida com a energia da fonte através da emissão de um fóton. Isto é chamado de emissão espontânea e os fótons produzidos por este método são a semente para a geração do laser [12].
- II. Os fótons emitidos pela emissão espontânea podem, eventualmente, colidir com elétrons que estejam em estados de energia mais altos. O fóton, ao colidir com o elétron, leva-o a descer para um nível de energia mais baixo, dando origem a um novo fóton. Estes dois fótons são coerentes, o que significa que estão em fase, com o mesmo comprimento de onda e deslocam-se com a mesma direção. Este fenómeno é designado de emissão estimulada [12].
- III. Os fótons são emitidos em todas as direções, levando a que se desloquem através do meio ativo até colidirem com os espelhos da cavidade ressonante e serem refletidos novamente para o meio ativo. Os espelhos da cavidade ressonante definem a direção de amplificação preferencial da emissão estimulada. Para que a amplificação ocorra, deve haver uma maior percentagem de átomos no estado excitado do que átomos em níveis de energia mais baixos. Esta “inversão de população” de mais átomos no estado excitado leva às condições exigidas para a geração da luz laser [12].

Na Figura 6 pode-se ver uma representação esquemática das três etapas da criação do feixe laser.

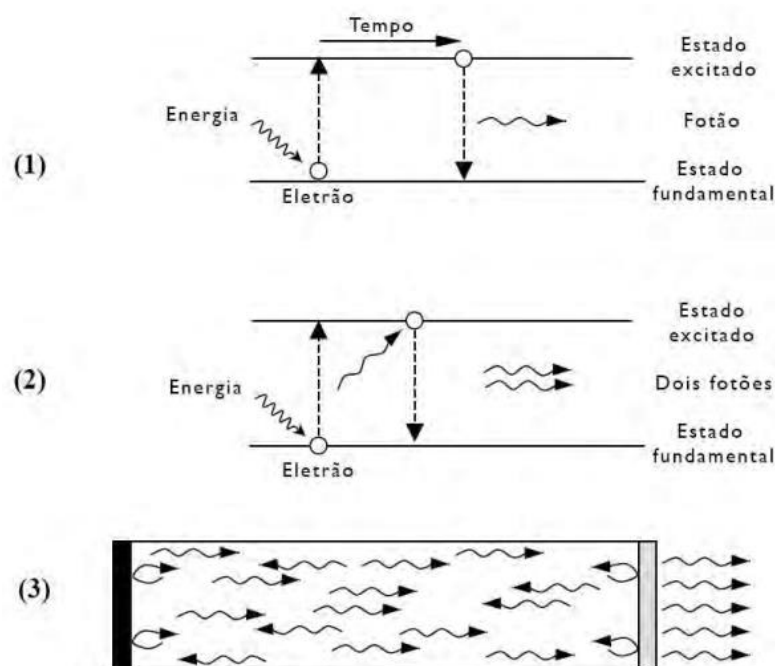


Figura 6 – Representação esquemática das três etapas de criação do feixe laser [12]

2.1.5 Tipos de laser

Atualmente é possível encontrar diversos tipos de laser que servem os propósitos das mais diferentes áreas de aplicação, devido à evolução constante desta tecnologia. Os lasers são geralmente classificados em quatro categorias principais, dependendo da natureza do seu meio ativo: lasers no estado sólido, lasers de gás, lasers de corante e lasers semicondutores [13].

Na Tabela 1 está uma lista com alguns exemplos dos lasers mais importantes de cada categoria [11], [14].

Tabela 1 – Tipos de laser

Tipo de laser	Exemplo
Laser de estado sólido	Nd:YAG Rubi Alexandrite Ti - safira
Laser de gás	Árgon Krypton CO ₂
Laser semicondutor	InGaAs AlGaInP InGaAsP
Laser de corante	Rodamina 6G Comarina 102 Estilbeno

2.1.5.1 Lasers de estado sólido

Uma vez que o laser utilizado neste trabalho é um Nd:YAG, será dado mais realce a este tipo de laser. Os lasers de estado sólido são usados na produção industrial desde o início da década de 1970. Os primeiros lasers era caracterizados por terem curtos pulsos de laser com uma potência de 1 kW ou mais, o que lhes conferia boas características para a soldadura por pontos e para furação [11].

Hoje em dia, existem muitos lasers de estado sólido diferentes. Estes lasers diferem na forma e no material do meio ativo, no design da cavidade ressonante e no tipo de fonte de excitação. Esta diversidade é o que confere aos lasers tanta versatilidade. Estes lasers são vulgarmente utilizados em soldadura, corte e furação [11].

Os lasers de Nd:YAG disponíveis no mercado possuem potências entre os 100 W e os 1000 W. Apesar desta vasta gama de potências, estes lasers possuem uma potência ainda inferior aos lasers

de CO₂, uma vez que estes conseguem atingir potências de pico na ordem dos 12 kW. Em termos de desempenho, um laser Nd:YAG de 150 W é capaz de soldar uma chapa de 0,5 mm de espessura a uma velocidade de 0,3 m/min, enquanto que um de 1 kW consegue soldar facilmente uma chapa de 4 mm de espessura à mesma velocidade [8].

Um dos aspetos mais importantes deste tipo de lasers é o comprimento de onda do feixe (1,06 µm) que pode ser transmitido através de um cabo de fibra ótica e que torna este laser muito atrativo para produção de soldaduras a altas velocidades e automação [11].

A representação esquemática dos lasers Nd:YAG está ilustrada na Figura 7.

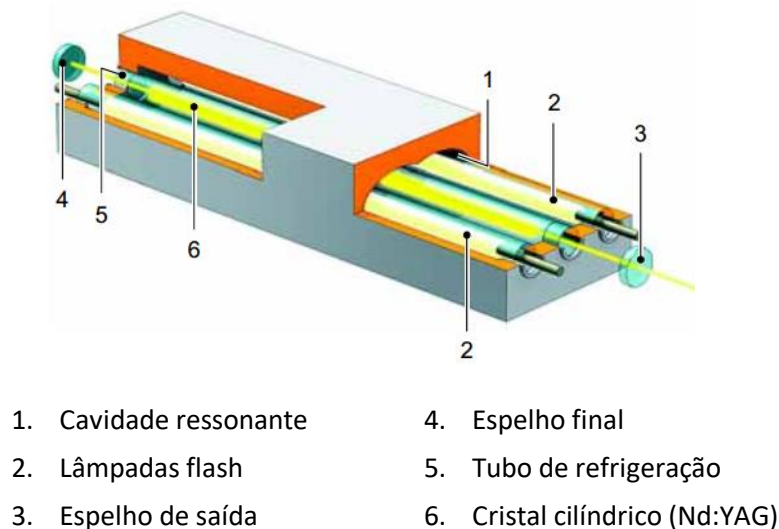


Figura 7 – Representação esquemática dos lasers Nd:YAG [11]

O laser Nd:YAG utiliza um meio ativo sólido cristalino constituído por um cilindro de YAG (*Yttrium Aluminium Garnet* (Y₃Al₅O₁₂)). Este cilindro encontra-se localizado na cavidade ressonante sendo excitado por lâmpadas de flash (krípton ou xénon). O número de lâmpadas a utilizar depende essencialmente da potência máxima que se pretende emitir. Estas lâmpadas podem ainda ser dispostas de várias formas [13].

A radiação laser é produzida através da emissão estimulada. Esta tem que ser amplificada numa cavidade ressonante para posteriormente ser emitida. A luz laser é então produzida no cilindro de Nd:YAG. As dimensões deste são importantes, pois quanto maior for o cilindro, maior será a potência máxima que o laser dispõe [13].

2.2 Soldadura

A soldadura é um processo de ligação permanente entre duas peças através de uma união íntima e atómica entre as superfícies de contacto, obtendo-se uma junta com propriedades

mecânicas análogas ou superiores às do metal base e mantendo-se a continuidade de natureza metálica ou não metálica através da ligação [15].

2.2.1 Modos de soldadura laser

Quando o feixe laser é irradiado na superfície de uma peça, ocorrem alguns fenómenos como a reflexão, refração, absorção, dispersão e transmissão. O fenómeno mais desejado e importante é a absorção da radiação. Esta absorção resulta em vários efeitos como aquecimento, fusão, vaporização, formação de plasma, etc. A intensidade de cada efeito depende das características do laser e das propriedades do material base a ser soldado [13].

Existem três modos de soldadura: por condução, por penetração ou *keyhole* e pela junção de ambos. A Figura 8 representa os três diferentes tipos de soldadura.

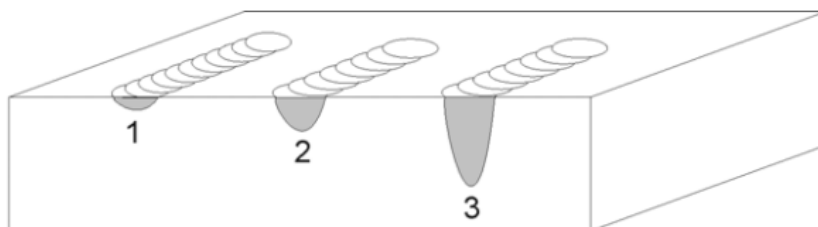
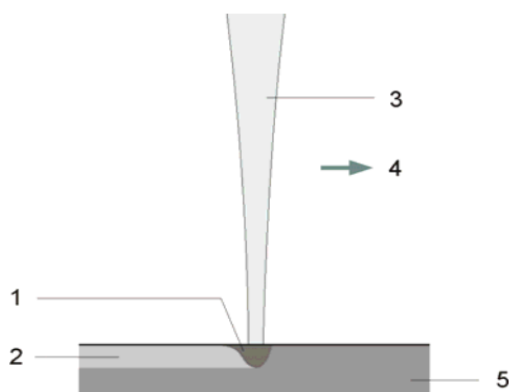


Figura 8 – Representação esquemática dos diferentes tipos de soldadura laser [12]

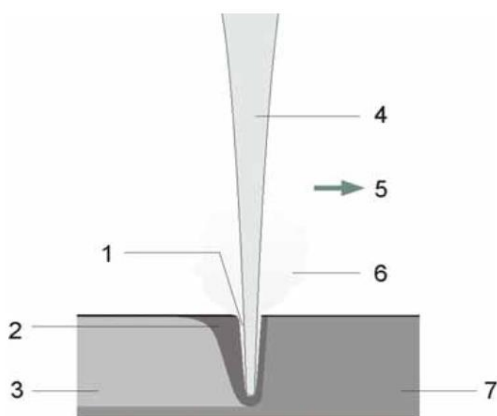
1. Soldadura laser por condução: Este modo de soldadura é caracterizado por uma baixa densidade de potência ($10^4 - 10^6 \text{ W.cm}^{-2}$), resultando um cordão com pouca penetração. O feixe laser funde o material ao longo do cordão e, quando este solidifica, forma o cordão de soldadura. Este modo geralmente é utilizado para soldar peças de reduzida espessura [11]–[13]. A Figura 9 mostra um esquema do processo.



- | | | |
|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1. Material fundido | 3. Feixe laser | 5. Material a soldar |
| 2. Cordão de soldadura | 4. Sentido de soldadura | |

Figura 9 – Representação esquemática do princípio de soldadura por condução [12]

2. Soldadura laser por condução/penetração: Este modo ocorre quando a densidade de potência ronda o ponto crítico de 10^6 W.cm^{-2} . O resultado é um cordão com maior penetração do que no modo anterior [11]–[13].
3. Soldadura laser por penetração ou *keyhole*: Este modo caracteriza-se por grandes penetrações de soldadura e requer elevadas densidades de potência (mais de 10^6 W.cm^{-2}). Neste processo, o feixe laser atinge a peça e rapidamente eleva a temperatura da mesma até ao ponto de fusão. Assim que o material começa a fundir, começa também a libertar vapor. O vapor que é dissipado exerce pressão no material fundido, mantendo a cavidade aberta durante a soldadura. Assim, o laser consegue alcançar zonas mais profundas originando soldaduras de penetração mais elevadas. O resultado é um profundo buraco estreito, cheio de vapor, denominado *keyhole*. A profundidade da soldadura pode ser dez vezes maior do que a largura do cordão. Este modo de soldadura é característico de lasers contínuos com elevada potência ou lasers pulsados com elevada energia [11]–[13]. A Figura 10 representa um esquema de soldadura laser por *keyhole*.



- | | | |
|------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1. <i>Keyhole</i> | 4. Feixe laser | 6. Vapor |
| 2. Material fundido | 5. Sentido da soldadura | 7. Material a soldar |
| 3. Cordão de soldadura | | |

Figura 10 – Representação esquemática da soldadura laser por *keyhole* [12]

2.2.2 Defeitos de soldadura

Uma soldadura ideal consiste numa continuidade total entre os elementos a ligar, de maneira a que seja impossível distinguir a junta dos elementos ligados. Contudo, este objetivo é quase impossível de se alcançar na prática, apesar de se conseguir ligações soldadas de elevada fiabilidade [15].

Durante a operação de soldadura, ocorrem vários fenómenos que acompanham a transformação do material desde o estado líquido até ao arrefecimento completo da ligação. Estes fenómenos estão representados na Figura 11.

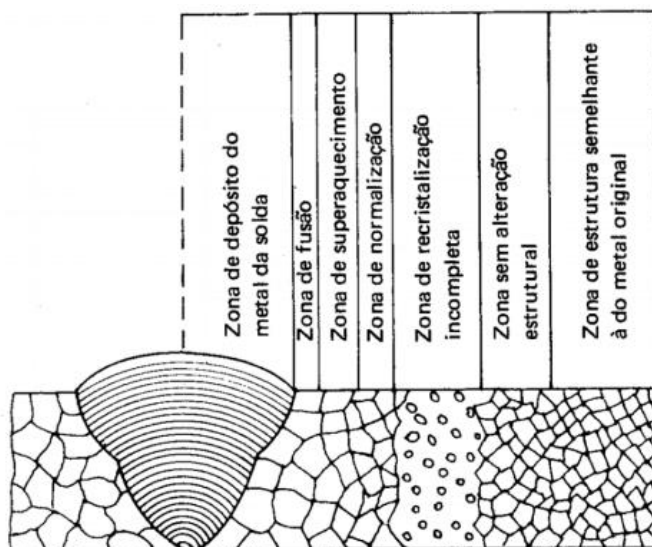


Figura 11 – Representação esquemática dos fenómenos metalúrgicos que ocorrem durante a soldadura [16]

Adjacente ao metal depositado encontra-se a zona de fusão, onde se observa uma transição entre o metal depositado e o metal base em que ocorreu fusão parcial, durante um certo tempo, e se deu a mistura das fases sólida e líquida. Na zona de sobreaquecimento houve um aumento do tamanho do grão e formação de uma estrutura acicular. Esta é a zona mais frágil da junta. A zona de normalização resulta numa redução dos grãos, o que se traduz numa melhoria das propriedades mecânicas. À medida que a distância à zona do metal depositado aumenta, verifica-se uma menor influência na estrutura do material, pois essas zonas foram menos afetadas pelo calor [16], [17].

Esta região onde ocorrem estas transformações que alteram a microestrutura do material, devido ao aquecimento e posterior arrefecimento, é designada de zona termicamente afetada (ZTA). Na Figura 12 encontram-se representadas as regiões características da ZTA.

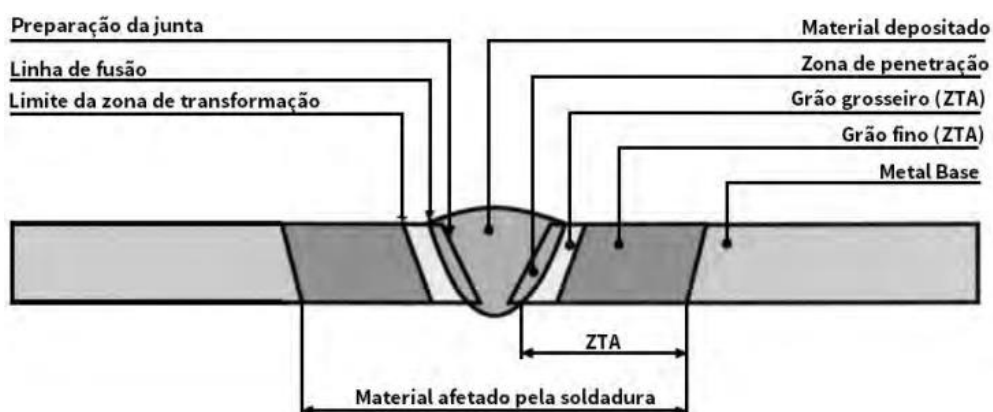
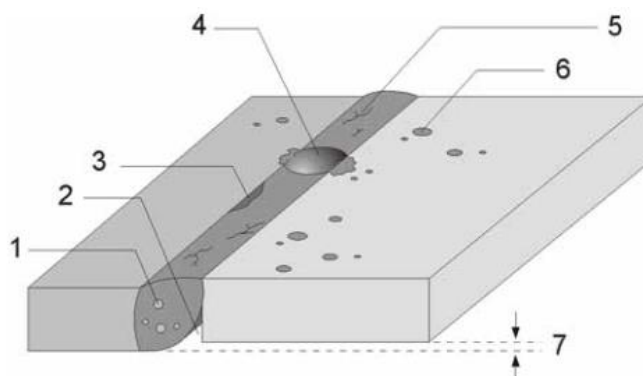


Figura 12 – Representação da zona termicamente afetada [48]

Os defeitos mais comuns na soldadura estão representados na Figura 13.



- | | | |
|------------------------|-------------|----------------------------|
| 1. Poros | 4. Crateras | 6. Salpicos |
| 2. Falta de penetração | 5. Fissuras | 7. Desalinhamento da junta |
| 3. Fusão incompleta | | |

Figura 13 – Defeitos internos de soldadura [11]

2.2.3 Parâmetros de soldadura

Os parâmetros do laser determinam a soldadura que se pretende fazer. Tal como em outros tipos de soldadura, esta também possui parâmetros que podem ser ajustados de maneira a se obter uma melhor combinação que garanta uma boa soldadura. Estes parâmetros podem ser os seguintes:

- I. Potência: define a potência máxima de cada pulso. É ajustada conforme se queira mais ou menos penetração.
- II. Duração do pulso: define o intervalo de tempo que o pulso atua sobre a peça no ponto focal.
- III. Sobreposição: define a sobreposição dos pulsos.
- IV. Diâmetro: define a área do feixe laser que entra em contacto com a peça.
- V. Tipo de pulso: define a forma de como a potência atua no intervalo de tempo selecionado.
- VI. Velocidade: define a velocidade de soldadura.

2.3 Aços avançados de alta resistência

As chapas feitas com aços avançados de alta resistência são uma das principais respostas da siderurgia face às restrições do consumo de energia e aos danos do meio ambiente. O caso da indústria automóvel é emblemático, já que cada vez mais é necessário reduzir o peso dos automóveis para minimizar o consumo de combustível e assim diminuir o custo e a agressão

ecológica associados ao seu uso. Chapas mais finas de aço com maior resistência mecânica permitem não só reduzir o peso das peças como também aumentar a resistência mecânica e a capacidade de absorção de energia, melhorando bastante a segurança dos passageiros [18], [19].

A família dos aços avançados de alta resistência é constituída por:

- Aços ferríticos-bainíticos (FB)
- Aços *dual-phase* (DP)
- Aços *complex-phase* (CP)
- Aços TRIP
- Aços TWIP
- Aços martensíticos (MS)

Na Figura 14 está ilustrada uma comparação entre os diversos tipos de aços.

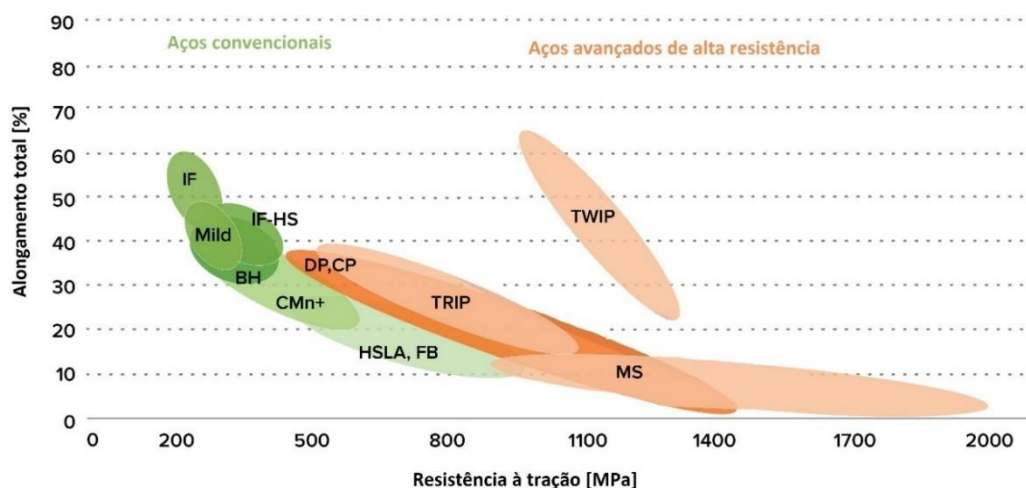


Figura 14 – Diferentes tipos de aços [49]

Os aços ferrítico-bainíticos (FB) são obtidos por laminação a quente e são detentores de uma microestrutura refinada de ferrite com uma segunda fase de bainite. O reforço é obtido através da refinação do grão e endurecimento da segunda fase. Este material define-se pelas suas boas propriedades de resistência à fadiga, boa soldabilidade e bom desempenho relativo ao impacto. Costuma ser usado em perfis, partes mecânicas, barras, suspensões e chassis [19], [20].

Os aços de fase complexa (CP) são caracterizados por uma microestrutura muito fina de matriz ferrítica e uma fração volumétrica alta de fases mais duras, como martensite e bainite, com um reforço adicional de precipitados de nióbio, titânio ou vanádio. Estes aços possuem uma alta capacidade de absorção de energia de deformação, sendo por isso bastantes usados na indústria automóvel em partes estruturais de segurança e em suspensões [19], [20].

Os aços TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) são materiais cujo aumento de resistência e ductilidade pode ser realizado através de uma transformação martensítica. Estes aços oferecem boas propriedades de resistência e ductilidade devido à sua microestrutura complexa, que associa

ferrite pró-eutetóide, bainite e frações significativas de austenite retida, gerada no final de um esquema de tratamento térmico específico. Este tipo de aço é usado essencialmente em partes automóveis que necessitem absorver uma grande quantidade de energia em casos de choque e colisões [19], [20].

Os aços TWIP (*Twining-Induced Plasticity*) destacam-se dos outros aços avançados de alta resistência devido à sua enorme elongação. São aços de base austenítica com um elevado teor de manganês. De facto, o teor de manganês é tão elevado que este aço é considerado por muitos não um aço, mas sim uma liga avançada. Apesar de ser um aço ainda a ser explorado, tem um enorme interesse para a área automóvel devido à sua grande capacidade de absorver energia [19], [20].

Os aços martensíticos são tratados predominantemente por martensite. O carbono é ainda adicionado a este material com o objetivo de aumentar o endurecimento e a resistência. Devido à sua elevada resistência, é usado em componentes vitais de segurança de automóveis, como pára-choques e barras contra impactos laterais [19], [20].

2.3.1 Aços *dual-phase*

Os aços *dual-phase* (DP) recebem este nome por apresentarem uma estrutura de 15% a 20% de martensite dispersa numa matriz de ferrite poligonal, obtida durante a austenitização na zona intercrítica, seguido de um arrefecimento rápido para a transformação da austenite previamente formada em martensite. O termo *dual-phase* vem da predominância das duas fases na sua microestrutura, contudo pode haver pequenas quantidades de bainite e perlite. A percentagem de martensite na estrutura depende da percentagem de carbono e da temperatura na zona intercrítica. O comportamento mecânico é governado pela ferrite, por se apresentar uma fração volumétrica maior e ser contínua na liga *dual-phase* [18], [21].

Na Figura 15 está representado uma imagem tirada a microscópio da microestrutura de um aço *dual-phase*.

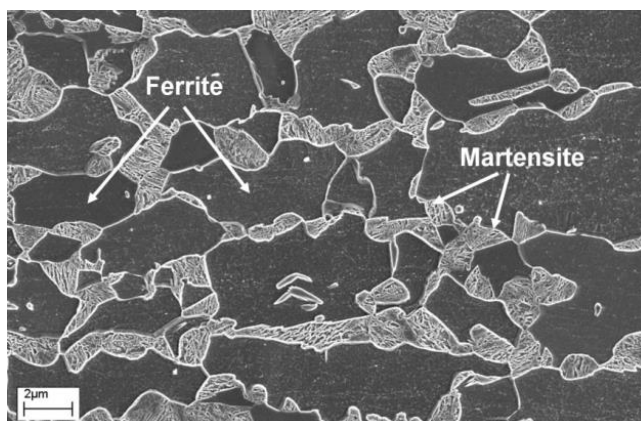


Figura 15 – Fotografia ao microscópio da microestrutura de um aço *dual-phase* [8]

Nos aços *dual-phase*, as ilhas de martensite dispersas na matriz ferrítica, atuam como obstáculos para o movimento das deslocções e contribuem para a melhoria da resistência mecânica. A fase martensítica tem um efeito benéfico na vida à fadiga, pois pode retardar ou impedir o crescimento de fissuras [18], [21].

2.3.1.1 Processamento do aço

Os aços DP podem ser obtidos de duas formas [21]:

- Laminados a quente e com arrefecimento controlado da fase austenítica.
- Laminados a frio e continuamente recozidos a partir do campo bifásico (ferrite + austenite), pela transformação de uma parte da austenite em ferrite antes que um arrefecimento rápido transforme a austenite restante em martensite.

A Figura 16 mostra uma representação esquemática da produção destes aços.

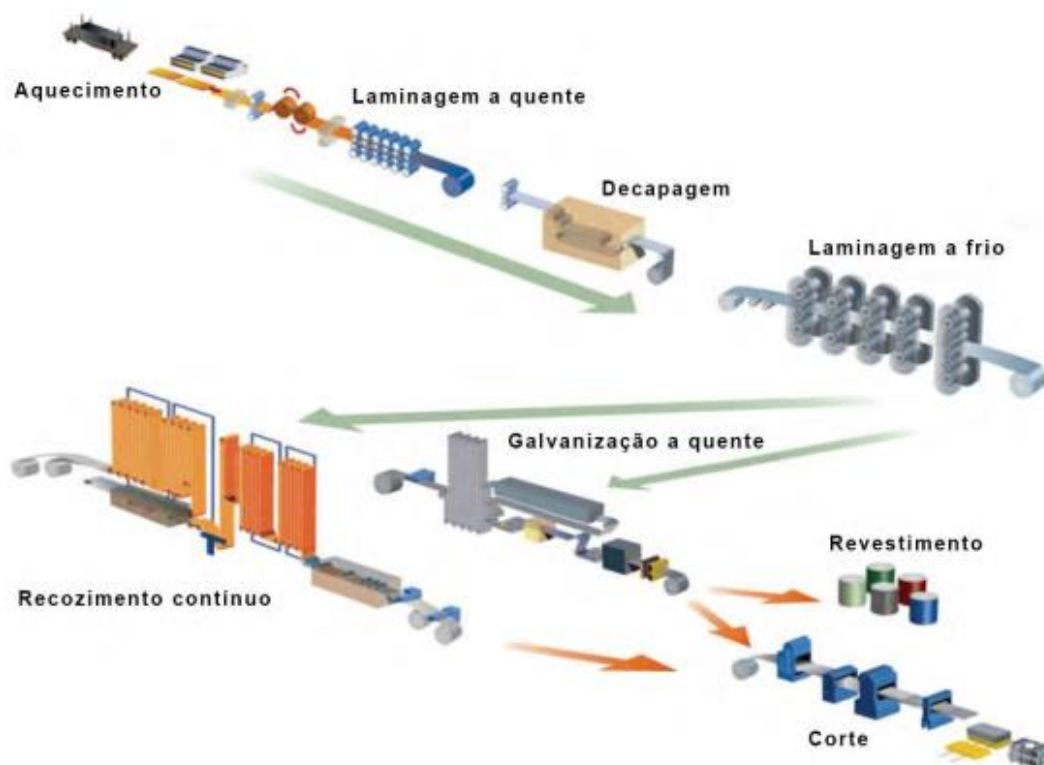


Figura 16 – Representação esquemática da produção do aço *dual-phase* [8]

2.3.1.2 Aplicações

Estes aços surgiram para satisfazer as necessidades e exigências rigorosas da indústria automóvel. Devido às suas boas características, estes aços têm vindo a ser cada vez mais utilizados e prevê-se que a sua utilização continue a aumentar, como se pode ver na Figura 17 [22].

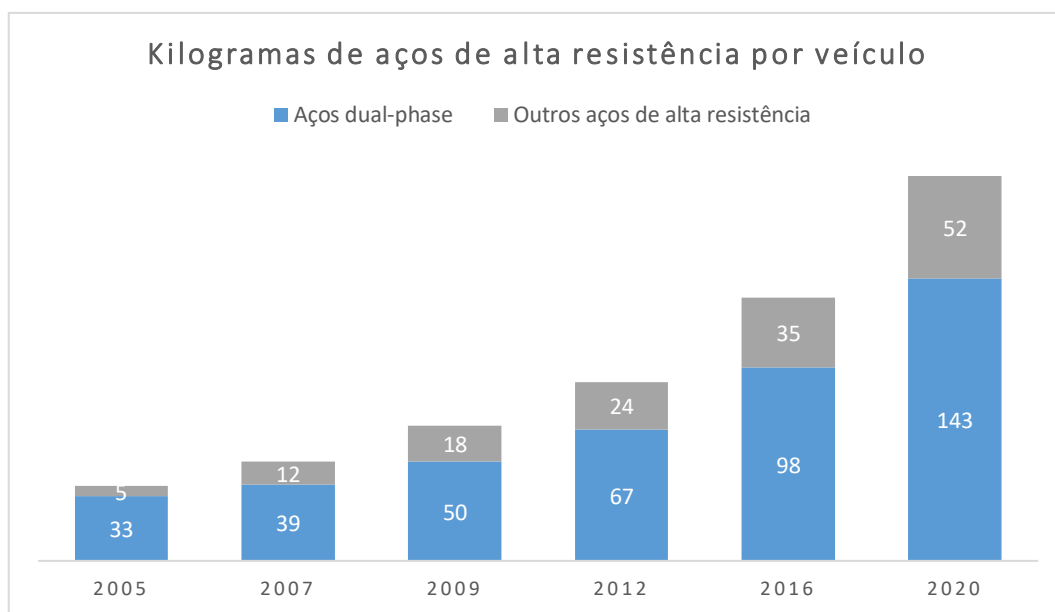


Figura 17 – Crescimento dos aços de alta resistência na indústria automóvel

A combinação de elevada resistência e elevada taxa de deformação, o que significa uma grande capacidade de absorção de energia, fazem dos aços *dual-phase* um produto especialmente usado na indústria automóvel para a construção de componentes de segurança [23]. A Tabela 2 mostra a aplicação dos aços DP na indústria automóvel.

Tabela 2 - Aplicações dos aços *dual-phase* na indústria automóvel

Aços <i>dual-phase</i>	Aplicações
DP300/500	Tejadilho, parte exterior da porta, painéis exteriores, painel do piso
DP350/600	Painel do piso, capô, pára-choques, reforço do piso
DP500/800	Partes interiores, reforços internos traseiros, reforços de choque traseiros
DP600/980	Componentes da gaiola de segurança (túnel do painel de piso, berço do motor, assentos)
DP700/1000	Barras do tejadilho

2.3.1.3 Propriedades do aço DP600 e DP1000

Nas Tabelas 3 e 4 e Tabelas 5 e 6 estão mostradas as propriedades mecânicas e a composição química dos aços DP600 e DP1000, respetivamente [7], [8]. Naturalmente, estes valores podem ser diferentes para amostras diferentes do mesmo material. Contudo estes valores servem como indicadores.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço DP600

Tensão de cedência [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Deformação máxima [%]	Dureza [HV0.5]
340	690	21	200

Tabela 4 – Composição química do aço DP600

Elemento	C	Mn	Si	Al	Mo	Cr	Cu	S	P
[%]	0,09	1,84	0,36	0,05	0,01	0,02	0,03	0,005	0,01

Tabela 5 – Propriedades mecânicas DP1000

Tensão de cedência [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Deformação máxima [%]	Dureza [HV0.5]
702	1099	10	325

Tabela 6 – Composição química DP1000

Elemento	C	Mn	Si	Al	Mo	Cr	Cu	S	P
[%]	0,123	1,44	0,484	0,04	0,005	0,012	0,011	0,002	0,01

2.4 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre e o mais abundante dos elementos metálicos, constituindo mais de 5% da massa terrestre. Contudo, na natureza, o alumínio existe unicamente em combinação com outros materiais [24].

O alumínio puro é um metal leve que, quando misturado com pequenas quantidades de outros materiais – ferro, magnésio, zinco, cobre, níquel, cromo, tungstênio, zircônio, boro, titânio, lítio e estanho – produz ligas com propriedades específicas. O principal objetivo da adição de elementos ao alumínio é o aumento do limite de elasticidade, da resistência e da dureza. Muito embora o alumínio puro apresente baixa resistência mecânica, as ligas de alumínio podem ter resistências muito elevadas. Em contrapartida, propriedades como, por exemplo, a ductilidade, a condutividade térmica e a resistência à corrosão diminuem com a adição de alguns elementos de liga [25], [26].

As ligas de alumínio têm uma densidade inferior a um terço da do aço, são dúcteis e maleáveis. São excelentes condutoras térmicas e elétricas. O alumínio e algumas das suas ligas, quando polidas, apresentam a reflexão mais elevada de todos os materiais. As ligas de alumínio podem ser fundidas, laminadas e extrudidas recorrendo a um grande número de processos tecnológicos [25], [26].

2.4.1 Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas a partir do elemento de liga mais abundante. Geralmente, utiliza-se uma designação com quatro algarismos para identificar a liga (Tabela 7). O primeiro indica o grupo de ligas que contêm determinados elementos de liga. O segundo indica eventuais modificações da liga, em que a original tem o dígito zero e as restantes que sofreram modificações são numeradas de um a nove. Os dois últimos algarismos da série 1xxx estão relacionados com a pureza da liga, por exemplo, a liga 1145 tem uma pureza de 99,45%. Nas restantes ligas, estes últimos dígitos servem para identificar diferentes ligas na mesma série [25], [27].

As designações dos tratamentos são indicadas após a referência da liga. As subdivisões do tratamento térmico básico são indicadas por um ou mais dígitos e aparecem a seguir à letra que designa o tratamento térmico (por exemplo, 1100-H14) [25], [27]. Na Tabela 8 pode-se ver quais os tratamentos nas ligas de alumínio.

É também conveniente dividir as ligas de alumínio em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente e as ligas não-tratáveis termicamente. As ligas do segundo grupo não endurecem por precipitação, sendo apenas endurecíveis por deformação a frio. As séries de ligas que pertencem a este grupo são as 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx. As restantes séries, 2xxx, 6xxx e 7xxx podem ser submetidas a tratamento térmico de endurecimento por precipitação [25], [28].

Tabela 7 – Designação numérica das ligas de alumínio

Designação numérica	Principal elemento de liga
1xxx	Alumínio puro (> 99,00%)
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Série livre

Tabela 8 – Designação dos tratamentos nas ligas de alumínio

Designação	Descrição
F	Tal como fabricado. Aplica-se a produtos nos quais não houve controlo das condições térmicas ou do encruamento.
O	Recozimento e recristalização. Aplica-se a produtos que são recozidos e recristalizados. Com este tratamento obtém-se menor resistência mecânica e maior ductilidade.
W	Tratamento térmico de solubilização. Liga sujeita a envelhecimento natural, à temperatura ambiente.
H	Tratamento de endurecimento por encruamento. Aplica-se a produtos endurecidos por processos de deformação.
T	Tratamento térmico para obtenção de estruturas estáveis para além de F, O ou H. Aplica-se a produtos tratados termicamente, com ou sem encruamento suplementar.

2.4.2 Liga de alumínio AA6060 T6

Atualmente, cerca de 80% da produção mundial anual de produtos extrudidos diz respeito às ligas Al-Mg-Si. Os principais elementos de liga deste grupo são o magnésio e o silício, que ao se combinarem provocam o endurecimento das ligas deste grupo [25].

Devido à sua versatilidade, a liga de alumínio AA6060 é umas das ligas mais usadas deste grupo, principalmente em aplicações onde se pretendem propriedades mecânicas moderadas, em simultâneo com uma boa resposta à anodização. Apresenta uma boa resistência à corrosão e boas características de soldabilidade. É usada em perfis de construção, sobretudo em caixilharia, na indústria automóvel e na indústria em geral [26], [29].

Neste trabalho, foi usado uma liga de alumínio AA6060 com tratamento térmico T6. Este tratamento aplica-se a produtos que sofreram tratamento de solubilização e foram envelhecidos artificialmente. A solubilização consiste em aquecer a liga e mantê-la a uma temperatura entre o ponto de solidificação e o ponto de fusão, até que se forme uma estrutura uniforme de solução sólida. O envelhecimento é necessário para que se possam formar precipitados finos e dispersos [25].

Na Tabela 9 e na Tabela 10 estão representadas as propriedades mecânicas e a composição química da liga de alumínio AA6060 T6 [29], [30]. Naturalmente, estes valores podem ser diferentes para amostras diferentes do mesmo material. Contudo estes valores servem como indicadores.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas da liga AA6060 T6

Tensão cedência [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Elongação máxima [%]	Dureza [HV0.5]	Ponto de fusão [°C]
160	190	10	80	650

Tabela 10 - Composição química da liga AA6060 T6

Elementos	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Fe	Zn
[%]	0,50	0,45	0,1	0,1	0,05	0,2	0,15

2.5 Titânio

O titânio encontra-se entre os dez elementos mais abundantes da crosta terrestre. Apresenta-se na natureza sob a forma mineral, sendo a mais comum a ilmenita (FeTiO_3) e rutilo (TiO_2), entre outras. É extraído através de operações bastantes complexas e energeticamente dispendiosas, das quais se destacam os processos *Kroll* e *Hunter* [31], [32].

Atualmente, o titânio e as suas ligas são utilizados em aplicações aeroespaciais e industriais, onde representam uma alternativa às ligas de alumínio, em particular quando é requerida elevada resistência a altas temperaturas. A sua utilização é também competitiva na indústria química, devido à excelente resistência à corrosão, bem como na medicina, por exemplo na construção de próteses, devido à associação da biocompatibilidade com excelentes características mecânicas [31].

2.5.1 Classificação das ligas de titânio

O titânio comercialmente puro apresenta, à temperatura ambiente, uma estrutura cristalina hexagonal compacta, conhecida como fase alfa (α) que se mantém até aos 882,5 °C. Neste patamar, ocorre uma transformação alotrópica que causa uma alteração para uma estrutura cúbica de corpo centrado, denominada de fase beta (β), que se mantém até aos 1672 °C, ocorrendo aí fusão do material [32].

Os elementos de liga presentes nas ligas de titânio promovem a estabilização da fase α ou da fase β , através da modificação da temperatura de transição. Os elementos que estabilizam a fase α são designados de α -estabilizadores, podendo-se indicar como exemplo o alumínio (Al), o oxigénio (O), o azoto (N) e o carbono (C). O oxigénio é considerado o elemento intersticial mais importante, uma vez que é o maior responsável pela alteração das características mecânicas do titânio. Os elementos que estabilizam a fase β são designados de β -estabilizadores, sendo os mais relevantes o molibdénio (Mo), o vanádio (V) e o nióbio (Nb) [32], [33].

Com estas fases, o titânio e as suas ligas são classificados em quatro categorias, de acordo com a microestrutura:

- I. Titânio comercialmente puro: tem uma excelente resistência à corrosão, mas baixas propriedades mecânicas. Contudo, com a adição de pequenas quantidades de ferro e oxigénio, é possível aumentar a sua resistência mecânica. Apresenta uma elevada aptidão para ser soldado [31], [32].
- II. Ligas α : apresentam níveis satisfatórios de resistência mecânica, resistência à corrosão, tenacidade, resistência à fluência e soldabilidade. São recomendadas para aplicações criogénicas [32], [33].
- III. Ligas α - β : apresentam tanto α como β -estabilizadores, em teores que permitam a coexistência das fases alfa e beta e, portanto, a combinação dessas propriedades, conferindo ao material uma maior versatilidade relativamente às outras ligas. Possuem

uma boa resistência mecânica em qualquer gama de temperaturas acima da ambiente, boas condições de conformabilidade e maquinabilidade, razoável soldabilidade, ótima relação resistência /peso e boa resistência à corrosão [32], [33].

Os materiais deste grupo são os mais requisitados, sendo que a liga Ti-6Al-4V é a mais usada.

- IV. Ligas β : apresentam uma elevada dureza e são todas biocompatíveis. São preferidas para aplicações em que é necessária a resistência a quente, sendo impróprias para baixas temperaturas [32], [33].

Na Tabela 11 são apresentadas algumas ligas de titânio agrupadas de acordo com as fases existentes.

Tabela 11 – Ligas de titânio

Alfa (α)	Alfa-Beta (α-β)	Beta (β)
Ti-0,2Pb	Ti-6Al-4V	Ti-13V-11Cr-3Al
Ti-5Al-2,5Sn	Ti-8Mn	Ti-Al-8V-5Fe
Ti-8Al-Mo-V	Ti-7Al-4Mo	
Ti-6Al-2Co-Ta-Mo	Ti-4Al-3Mo-V	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-3Al-2,5V	

2.5.2 Liga de titânio Ti-6Al-4V

A liga de titânio mais usada é a Ti-6Al-4V, graças à sua boa maquinabilidade e às suas excelentes propriedades mecânicas. Esta liga é classificada como alfa-beta [34].

É na indústria aeroespacial onde se verifica a maior aplicação desta liga de titânio, representando cerca de 75% da produção mundial, usada tanto ao nível estrutural como em componentes móveis. As principais razões que justificam a utilização de titânio na indústria aeroespacial são a redução de massa e volume dos componentes, garantindo assim uma redução no consumo de combustível e na emissão de poluentes, bem como a alta compatibilidade com materiais compósitos e a possibilidade de operação em ambientes altamente corrosivos e sob elevadas temperaturas [32], [35].

A indústria automóvel também usa esta liga, em menor escala, em alguns componentes do motor. É também usada em aplicações onde se explora a resistência à corrosão, como em processos químicos, aplicações marítimas e produção e armazenamento de energia. Graças à sua

biocompatibilidade, esta liga é usada também em aplicações biomédicas, principalmente em implantes cirúrgicos e próteses [32], [34], [36].

Na Tabela 12 e na Tabela 13 estão representadas as propriedades mecânicas e a composição química da liga de titânio Ti-6Al-4V [33], [34]. Naturalmente, estes valores podem ser diferentes para amostras diferentes do mesmo material. Contudo, estes valores servem como indicadores.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V

Tensão cedência [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Elongação máxima [%]	Dureza [HV0.5]	Ponto de fusão [°C]
880	950	15	340	1700

Tabela 13 - Composição química da liga Ti-6Al-4V

Elementos	Al	V	Fe	C	N	H
[%]	5,50 - 6,75	3,5 - 4,5	<0,4	<0,2	<0,05	<0,125

Tabela 14 – Características do laser SISMA SWA300

Sistema Laser	Nd:YAG
Potência média máxima	150 W
Potência de pico máxima	12 kW
Energia máxima do pulso	100 J
Duração do pulso	0.2 - 25 ms
Frequência	0 – 200 Hz
Diâmetro do ponto	0.6 – 2 mm
Tensão de alimentação laser	400 V trifásico
Tensão de alimentação SWA	230 V monofásico
Curso do eixo X, Y	150 mm
Curso do eixo Z	500 mm
Rotação do braço de soldadura	90°
Nível de ruído máximo	55 dB
Peso	310 kg
Dimensões da máquina	2100 x 1200 x 1610 mm
Controlo manual dos eixos	Sim
Controlo assistido dos eixos	Modo semiautomático

Para controlar os eixos X, Y e Z e para acionar a emissão laser, utiliza-se o *joystick* da máquina (Figura 19 e 20). Para tal, usam-se os seguintes movimentos:

- Mover o *joystick* para a esquerda e para a direita, e para cima ou para baixo, para controlar os eixos horizontais X e Y, respetivamente;
- Rodar o *joystick* no sentido horário ou anti-horário, para controlar o eixo vertical Z;
- Clicar no botão superior do *joystick* para ativar a emissão do laser.



Figura 19 – Joystick da máquina laser

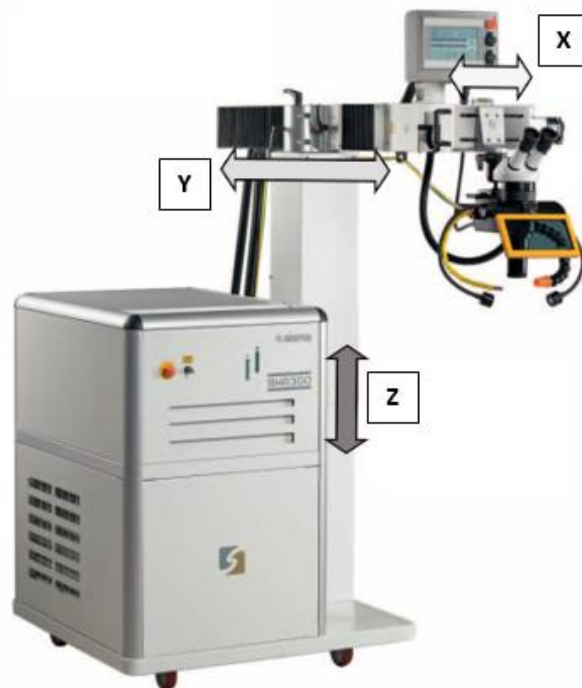


Figura 20 – Eixos da máquina laser

Para configurar os parâmetros do laser utiliza-se o ecrã tátil. Na Figura 21 está representada a janela principal de trabalho. Esta pode-se dividir da seguinte forma:

1. Configurações dos parâmetros laser;
2. Funcionalidades operacionais;
3. Indicação de energia e de potência média;
4. Outras funções: gerenciamento de programas memorizados, tipos de pulso, alarmes em vigor, retorno ao menu principal, ativação do laser, ligação da lâmpada.



Figura 21 – Ecrã tátil

As configurações dos parâmetros laser podem ser detalhadas do seguinte modo (Figura 22):

1. Potência do pico do pulso laser expressa em percentagem – de 1% a 99%.
2. Duração do pulso laser em milissegundos
3. Frequência/sobreposição dos pontos de soldadura em Hz/percentagem
4. Diâmetro do ponto do laser em mm
5. Tipo de pulso laser: este parâmetro não é reconhecido como um parâmetro de soldadura, contudo considerou-se como tal pois tem influência na soldadura.

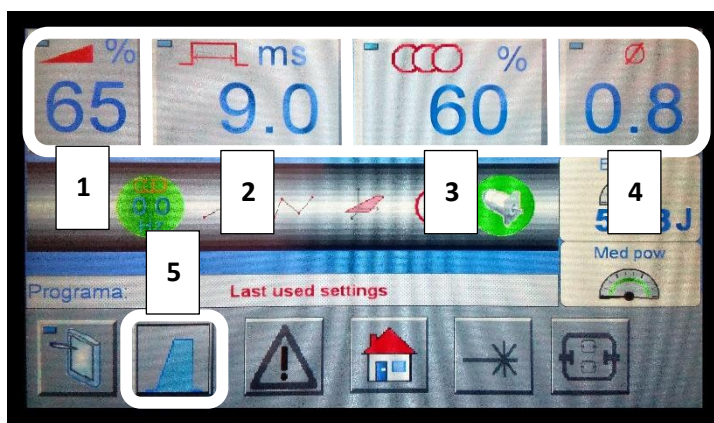


Figura 22 – Parâmetros do laser

3.2 Dispositivo de fixação

Sendo a máquina de soldadura laser concebida para fazer manutenção e reparação de moldes, naturalmente que, aquando da sua aquisição por parte do departamento de engenharia mecânica, não trouxe qualquer dispositivo de fixação para provetes. Assim, no âmbito de outros trabalhos realizados em anos anteriores que envolveram o laser, foram criados alguns dispositivos de fixação.

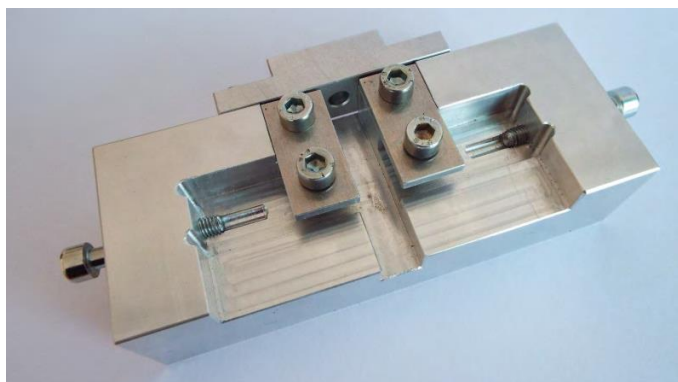
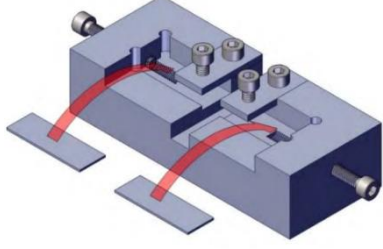
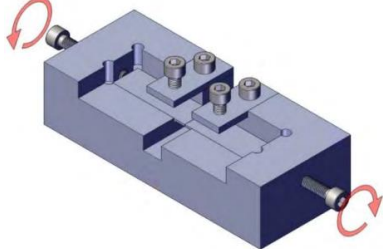
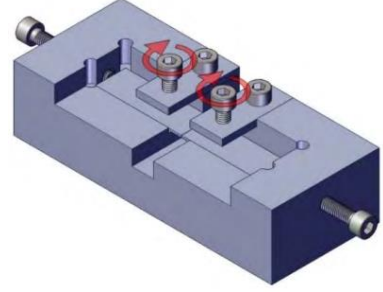


Figura 23 – Dispositivo de fixação de provetes

Na Figura 23 está representado um dos sistemas de fixação. Este dispositivo foi projetado de forma a ser um sistema simples e rápido de usar. É também bastante eficaz na fixação das amostras. O funcionamento do dispositivo de fixação de amostras está explicado na Tabela 15.

Tabela 15 – Funcionamento do dispositivo de fixação [8]

 <p>(a) – Etapa 1</p>	<p>A primeira etapa consiste em colocar as duas amostras que se pretendem soldar no entalhe próprio para o efeito ilustrado em (a).</p>
 <p>(b) – Etapa 2</p>	<p>A segunda etapa visa proporcionar o encosto máximo entre os topos das amostras. Para isso, apertam-se os parafusos que estão na horizontal, representados em (b).</p>
 <p>(c) – Etapa 3</p>	<p>Por último, basta apertar os parafusos verticais para fixar as amostras e garantir que as duas amostras estão niveladas. Na representação (c) mostram-se os parafusos a operar.</p>

Para além do sistema de fixação, este dispositivo foi também projetado para que as amostras fossem protegidas pelo gás que protege a soldadura, pois o bocal do gás próprio do laser não conseguia cumprir isso [8].

Quando se começa a soldar os provetes, o bocal que liberta o gás de proteção da soldadura encontra-se a uma distância mínima (X) do dispositivo de fixação (Figura 24). No entanto, uma vez que o bocal se desloca solidariamente com os eixos da máquina, quando se termina a soldadura das amostras, o eixo da máquina percorreu uma distância igual à largura das amostras. Isso significa que o bocal se afastou do dispositivo de fixação a mesma distância, não garantindo as mesmas condições de soldadura no início e no fim da mesma [8].

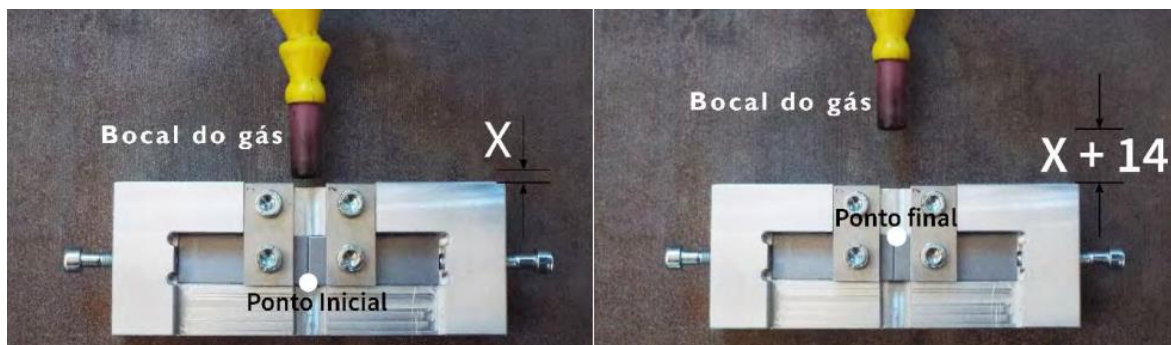


Figura 24 – Bocal do gás na posição inicial e final

Com vista a resolver este problema, foi construído um adaptador para o dispositivo de fixação. Este adaptador tem como principal objetivo garantir que o gás seja sempre expelido nas mesmas condições para todos e quaisquer testes de soldadura [8]. O adaptador possui dois furos, um inclinado para a proteção da parte superior da soldadura e outro horizontal para proteger a parte inferior da soldadura (Figura 25). Estes furos servem para alojar um tubo de plástico flexível que transporta o gás.

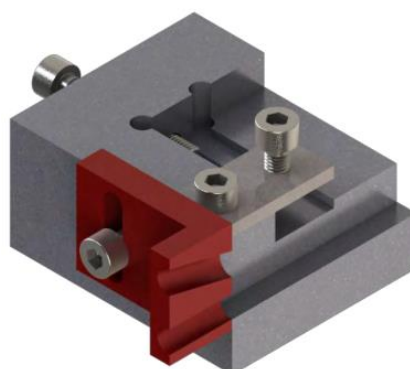


Figura 25 – Furos responsáveis pela canalização do gás (vista em corte) [8]

O furo superior mostrou-se bastante eficaz na proteção de toda a superfície superior da amostra a soldar. Por outro lado, a existência do furo inferior pouco protegia a parte inferior da amostra.

Deste modo, com o objetivo de melhorar a qualidade da soldadura, principalmente na parte inferior, idealizou-se uma espécie de caixa para cobrir as amostras durante a soldadura. A ideia seria criar uma atmosfera rica em gás e, deste modo, conseguir proteger completamente a soldadura de ambos os lados. Como a caixa teria de ser transparente, para se poder ver a luminosidade vinda das lanternas do laser, foi feita em acrílico. Foram cortadas as várias partes e posteriormente coladas (Figura 26). A única abertura que tem serve para a passagem do feixe de laser. Foi também tapado, com um paralelepípedo de aço, o rasgo que o dispositivo tem a meio, para impedir que o gás saísse.

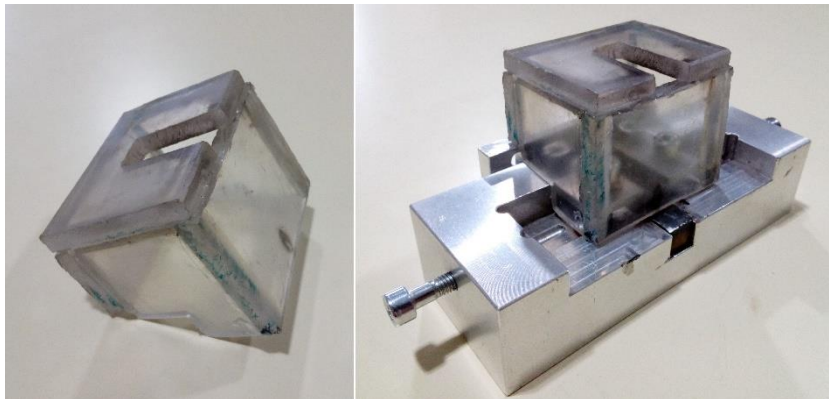


Figura 26 – Caixa para criar atmosfera rica em árgon

Nas figuras abaixo é possível ver a comparação das soldaduras, sem e com a caixa. Há um aumento notável da qualidade visual de soldadura, sendo a grande discrepância nas partes inferiores. Quando se faz uso da caixa, a soldadura inferior (lado da raiz do cordão) não apresenta oxidação (Figura 28). Pode-se assim dizer que esta caixa é uma inovação, pois conseguiu-se melhorar significativamente o dispositivo de fixação das amostras.

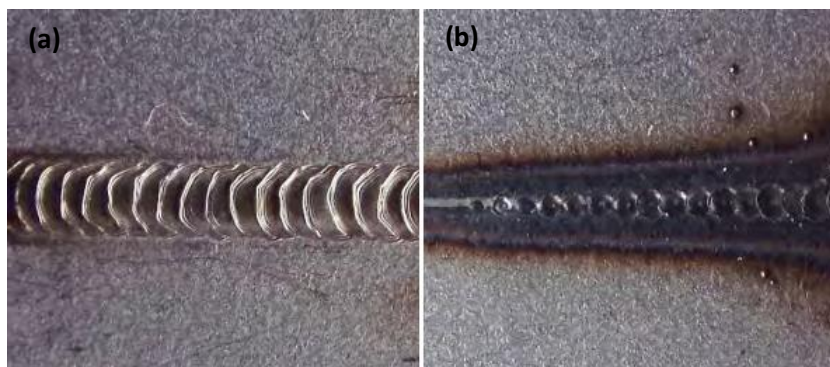


Figura 27 – Soldadura laser (partes superior (a) e inferior (b)) sem a caixa

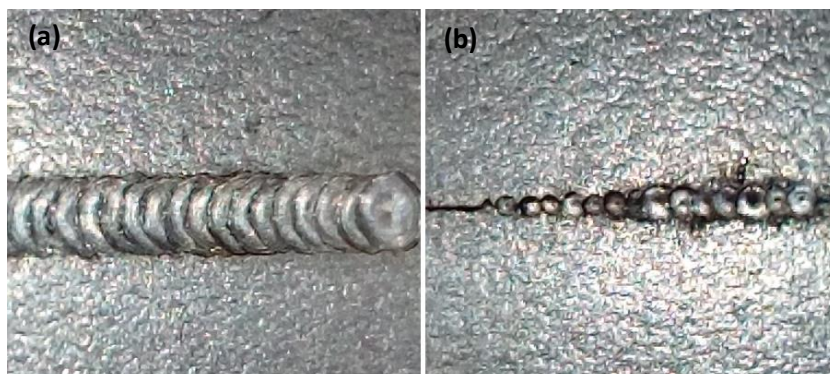


Figura 28 – Soldadura laser (partes superior (a) e inferior (b)) com a caixa

Para além da melhoria significativa da qualidade da soldadura, esta caixa trás outro benefício: poupança de gás. Para se obter soldaduras com a qualidade visual apresentada da Figura 27, era necessário um caudal de 10 l/min. Com a caixa, basta um caudal de 2 l/min para se obter boa qualidade nos dois lados superior e inferior (Figura 28). Há uma redução de 80% de gás, podendo-se assim dizer que a caixa é também uma solução mais sustentável e amiga do ambiente.

O gás de proteção utilizado em todos os trabalhos desta dissertação foi o Árgon ARCAL TIG MIG fornecido pela empresa Air Liquide.

3.3 Parâmetros do laser

Antes de se partir para a soldadura de metais dissimilares, com o intuito de poupar material, foram realizados testes de verificação de soldadura em amostras de aço DP1000 que já se encontravam no laboratório de soldadura do departamento de engenharia mecânica. O objetivo destes testes era confirmar os parâmetros ou intervalos de parâmetros ótimos do laser. Para tal, recorreu-se também a um trabalho de dissertação do ano anterior, focado na mesma máquina de soldadura laser.

De uma maneira resumida, retirou-se o seguinte:

- Potência do feixe laser: a penetração da soldadura é diretamente proporcional à potência do feixe laser. Verificou-se, no caso do aço DP1000, que o parâmetro de potência ideal se deve situar entre os 40% e os 60%. [8]
- Duração do pulso do feixe laser: a penetração da soldadura é diretamente proporcional à duração do pulso [8]. Verificou-se que os melhores resultados se obtiveram com durações de 8 ms a 15 ms.
- Sobreposição dos pontos de soldadura: a sobreposição não afeta a penetração da soldadura, mas só até ao valor de 80%. Acima deste valor as amostras começam a fundir-se e o material é vazado [8]. O intervalo ideal de sobreposição é entre 50% e 70%.
- Diâmetro do feixe laser: a penetração da soldadura é inversamente proporcional ao diâmetro do feixe laser [8]. Os melhores resultados foram obtidos com diâmetros de 0,8 mm a 1,4 mm.
- Tipo de pulso do feixe laser: com exceção do pulso “escala expandida”, os diferentes tipos de pulso possuem apenas ligeiras diferenças entre si na penetração da soldadura. [8]
- Velocidade de soldadura: quanto maior a velocidade, maior é a penetração da soldadura [8].

Contudo, a velocidade é limitada pela quantidade de energia que será usada pelo laser. Quanto maior a energia, isto é, quanto maior a potência e/ou a duração do pulso do

feixe laser, menor será a velocidade máxima permitida pela máquina laser. Como os melhores resultados em termos de penetração são obtidos com velocidades mais altas, é interessante usar sempre a velocidade mais alta permitida pela máquina para cada uma das configurações.

3.4 Soldadura DP600 – DP1000

Um par de metais dissimilares selecionados para este trabalho foram os aços *dual-phase* 600 e *dual-phase* 1000, com 0,8 mm de espessura.

3.4.1 Preparação das amostras

Estes materiais encontram-se na forma de chapas de dimensões 2000x1250x0,8 [mm]. Deste modo, numa primeira fase, é necessário cortar as chapas de forma a obter amostras de dimensões reduzidas, de modo a que estas sejam facilmente soldadas e analisadas sem que exista um grande desperdício de material. Por outro lado, estas amostras devem permitir obter resultados credíveis e conclusivos. As dimensões das amostras estão representadas na Figura 29.

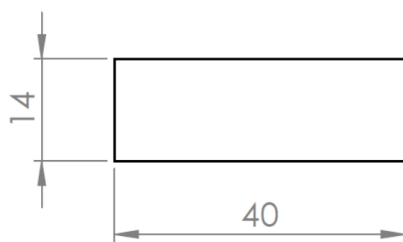


Figura 29 – Dimensões em mm das amostras dos aços *dual-phase*

As amostras foram cortadas na guilhotina da marca Guifil existente no departamento de engenharia mecânica (Figura 30).



Figura 30 – Guilhotina Guifil

Aquando do corte das amostras, teve-se o cuidado para que estas fossem cortadas segundo a mesma direção de laminagem, de modo a que a direção dos futuros testes de tração tenha a mesma direção da de laminagem. Uma vez que o que se pretende estudar são os parâmetros de soldadura e não a influencia da anisotropia, os resultados podem ser comparados sem ter em conta o fator de anisotropia, pois este é igual para todas as amostras.

As amostras vão ser soldadas topo a topo como ilustra a Figura 31. A seta representa a direção de laminagem.

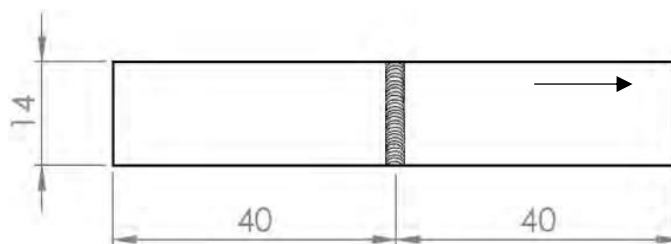


Figura 31 – Amostras de aço *dual-phase* soldadas topo a topo (dimensões em mm)

Como as amostras vão ser soldadas topo a topo e sem material de adição, é fundamental que estas tenham o maior contacto possível. No entanto, as operações de corte mecânico produzem por norma descontinuidades, principalmente rebarbas, na região dos bordos [38]. A Figura 32 ilustra um esquema de corte por guilhotina, onde se podem ver as irregularidades.

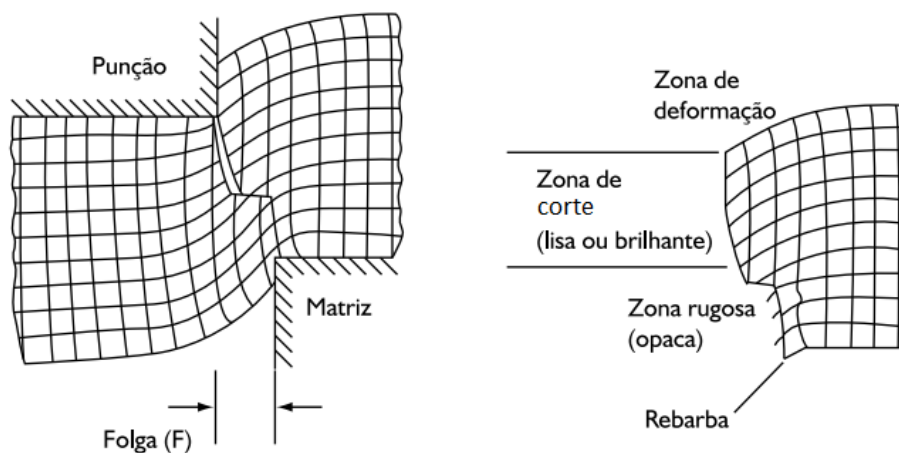


Figura 32 – Esquema de corte por guilhotina

Na Figura 33, pode-se observar uma vista de uma superfície típica de uma peça cortada por guilhotina.

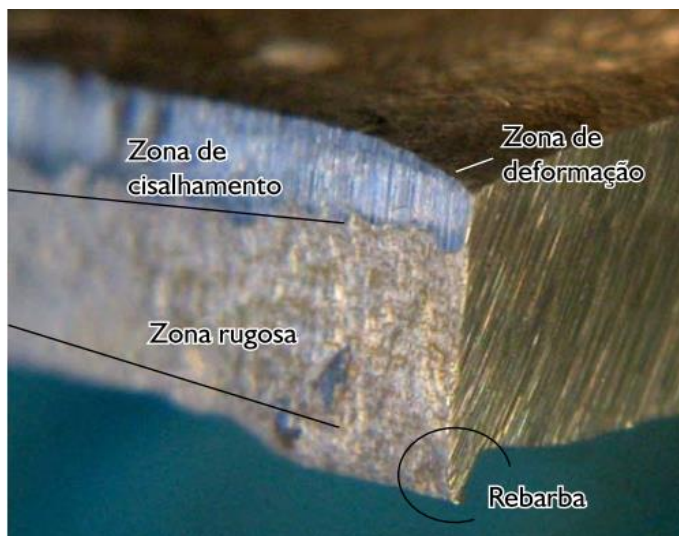


Figura 33 – Superfície típica de uma peça cortada por guilhotina

Os processos de corte envolvem, geralmente, aquecimento e fusão localizada do material, que por vezes levam a alterações microestruturais que podem influenciar o desempenho do material, originando problemas no uso posterior da chapa [38].

De maneira a minimizar as irregularidades e alterações microestruturais das superfícies cortadas na guilhotina e, deste modo, maximizar o encosto entre as amostras, decidiu-se maquinar um topo de cada amostra. Para tal, utilizou-se o centro de maquinagem MIKRON VCE 500, existente no departamento de engenharia mecânica (Figura 34).

Os defeitos provenientes do corte por guilhotina foram assim eliminados. Contudo, após a maquinagem dos topos das amostras, foi necessário lixar os mesmos para eliminar algumas rebarbas provenientes do processo.



Figura 34 – Fresadora CNC MIKRON VCE 500

3.4.2 Soldadura

Após terem sido feitos alguns testes de soldadura, decidiu-se usar os parâmetros que estão na Tabela 16 para a obtenção das amostras a serem estudadas. Numa primeira fase procurou-se atingir penetração total da soldadura, tendo sido obtida na amostra 1.

De seguida, considerando adequado manter constante a potência da máquina nos 50%, a sobreposição em 60% e o diâmetro do feixe laser em 1,2 mm, foi-se diminuindo o valor da duração do pulso até não se obter penetração total, procurando assim otimizar a energia de maneira a se conseguir uma boa soldadura. Para cada parâmetro, foram repetidos três provetes.

Tabela 16 – Parâmetros de soldadura para os aços *dual-phase*

Amostra	Potência [%]	Duração pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]
1	50	12	60	1,2
2		11		
3		10		
4		9		
5		8		
6		7		
7		6		
8		5		

3.4.3 Maquinagem dos provetes

Depois de realizada a soldadura nas amostras, estas tiveram de ser maquinadas para formar um provete que será utilizado nos ensaios de tração. A maquinagem dos provetes foi realizada no centro de maquinagem MIKRON VCE 500.

As dimensões do provete cumprem com a norma ISO 6892-1:2009. A Figura 35 ilustra as dimensões do provete.

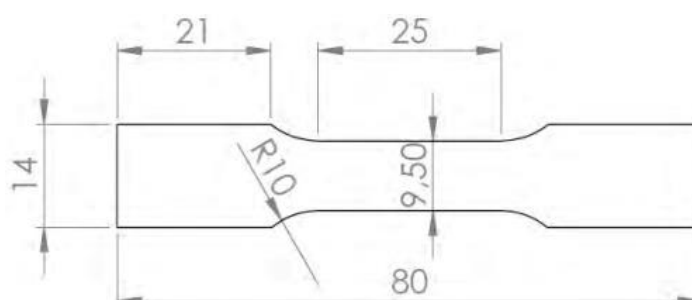










Figura 35 – Dimensões do provete segunda a norma ISO 6892-1:2009

Após a maquinagem das amostras, obtiveram-se os provetes da Tabela 17.

Contrariamente ao trabalho anterior realizado por [8] entre DP1000 - DP1000, no caso presente não foi retificada a espessura do provete, no sentido de garantir a sua uniformidade.

Tabela 17 – Amostras maquinadas

1	2	3	4	5	6	7	8
							

3.4.4 Ensaios de tração

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas das amostras soldadas e avaliar a influência da duração de pulso do feixe laser na resistência mecânica e deformação do provete, prosseguiu-se para os ensaios de tração, realizados na máquina de tração Shimadzu de 100 kN (Figura 36), de acordo com as recomendações da norma ISO 6892-1:2009 para ensaios estáticos [39].

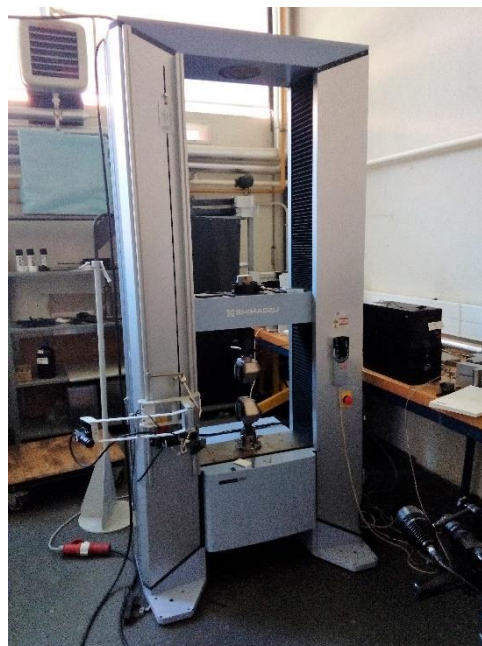


Figura 36 - Shimadzu AGX 100 kN

O princípio de funcionamento deste tipo de ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial, por intermédio de duas maxilas que seguram o provete, estando uma fixa e outra que se desloca. Por norma, os materiais metálicos sujeitos a este ensaio apresentam o comportamento apresentado na Figura 37.

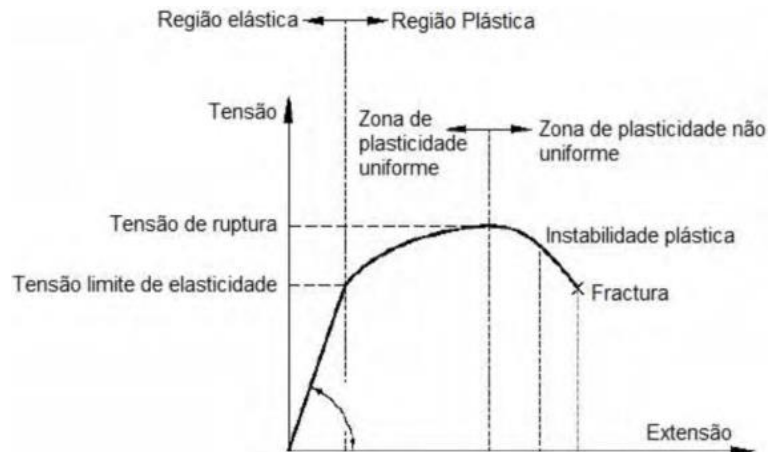


Figura 37 – Curva tensão - deformação

Para caracterizar o material, foram usadas as seguintes equações:

I. Tensão nominal:

(1)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

σ – Tensão nominal

F – Força

A_0 = Área inicial

II. Deformação nominal:

(2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

ε – Deformação nominal ΔL – Variação do comprimento L_0 – Comprimento inicial entre marcas

III. Tensão real:

(3)

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

σ_{real} – Tensão real

σ – Tensão nominal

ε – Deformação nominal

IV. Deformação real:

(4)

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon)$$

ε_{real} – Deformação real ε – Deformação nominal

V. Tensão de rutura:

(5)

$$\sigma_r = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

σ_r – Tensão rutura

F_{\max} – Força máxima

A_0 – Área inicial

Para determinar a área da secção do provete é necessário medir a sua espessura e largura, utilizando-se para tal um paquímetro.

De maneira a se obter os valores de largura e espessura médios, mediram-se dois pontos para a largura (L1 e L2) e para a espessura (E1 e E2). Posteriormente, fez-se a média destes pontos e determinou-se a área da secção inicial. A Figura 38 ilustra o sítio das medições efetuadas.

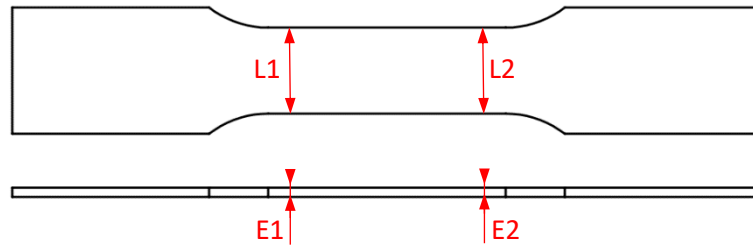


Figura 38 – Pontos de medição do provete

Para os ensaios de tração utilizaram-se dois *softwares* diferentes para se obterem os resultados experimentais. Um *software*, o Trapezium X, é o próprio da máquina de tração, que serve para a controlar e para se obterem os dados dos ensaios realizados, como a força e os deslocamentos, sendo estes últimos medidos pelo vídeoextensómetro incorporado no equipamento (Figura 39).



Figura 39 - Vídeoextensómetro da Shimadzu AGX 100 kN

Foram testadas todas as amostras usando o *software* da *Shimadzu*. Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de 3 mm/min. Para além dos provetes soldados, foram testados provetes de aço DP600 e DP1000 sem soldadura (só metal base) para comparar os resultados.

3.4.4.1 ARAMIS

O outro *software* usado foi o ARAMIS, um sistema ótico 3D para análise de deformação por correlação digital de imagem. É ideal para medições tridimensionais de deformação em componentes e materiais reais, fornecendo resultados com uma resolução e precisão elevadas [40].

Como houve o processo de soldadura das amostras, prevê-se que haja uma zona termicamente afetada nos provetes. Além disso, está-se a soldar dois materiais com características diferentes. Consequentemente, os provetes irão ter um comportamento diferente dos outros que são apenas maquinados e que são de um material só. Deste modo, surgiu a necessidade de optar por outro meio que conseguisse analisar esta particularidade, pois o videoextensómetro da *Shimadzu* só analisa duas marcas e, portanto, não o consegue fazer de forma tão assertiva.

O ensaio de tração com ARAMIS foi apenas feito num provete. Antes de se efetuar o ensaio, foi necessário fazer a preparação do provete, bem como do *hardware* e *software* do ARAMIS.

Inicialmente pintou-se o provete apenas de um lado, de branco, e depois pulverizou-se com tinta preta, de acordo com as instruções do ARAMIS. O provete preparado está ilustrado na Figura 40.



Figura 40 – Provete preparado para ensaio ARAMIS

Através deste gradiente de pintas pretas num fundo branco, o *software* cria uma malha de modo a cobrir toda a área do provete. A partir desta malha é feita a análise dos deslocamentos dos pontos a duas dimensões, e por interpolação é calculado o deslocamento para a terceira dimensão, que neste caso não é relevante.

Após a pintura, coloca-se o provete na máquina de tração e calibra-se o *hardware* de aquisição de imagens. Este *hardware* é composto por duas câmaras, dois projetores de luz, um laser e um computador (Figura 41). O laser serve para auxiliar o posicionamento de todo o sistema de aquisição de imagem, fazendo mira para o provete.

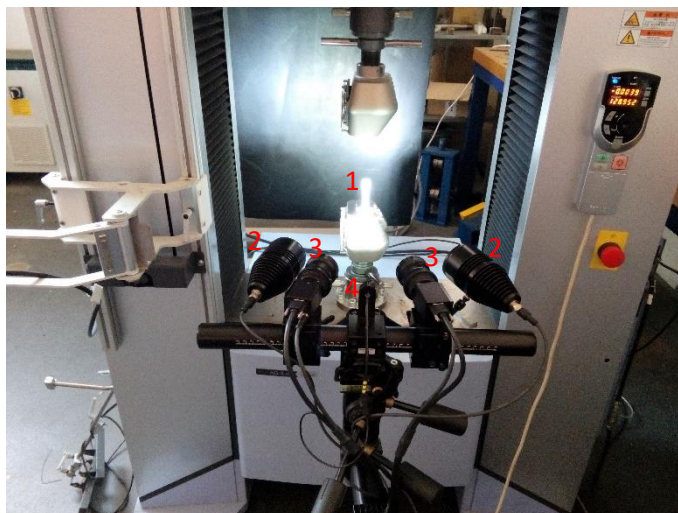


Figura 41 - Setup das câmaras: 1 - provete, 2 - fontes de luz, 3 - câmaras, 4 - laser

Após os ajustes preliminares do posicionamento das câmaras e das fontes de luz em frente ao provete com o auxílio do laser e do computador, onde se podem ver as imagens das câmaras em tempo real, procedeu-se à calibração das mesmas. Esta calibração passa por posicionar as câmaras, a uma distância dada pelo manual do ARAMIS, em frente a uma matriz de calibração. Este processo de calibração consiste na captura de fotos à matriz em várias posições, de acordo com o pedido do software. Isto permite configurar e definir o ponto focal. Posteriormente, tornou-se a colocar o hardware à distância configurada em relação ao provete.

O ensaio de tração com ARAMIS foi também efetuado a uma velocidade de 3 mm/min.

3.5 Soldadura alumínio – titânio

O outro par de metais dissimilares selecionados para este trabalho são a liga de alumínio AA6060 T6 e a liga de titânio Ti-6Al-4V.

3.5.1 Preparação das amostras

A liga de alumínio vem na forma de perfil industrial, enquanto que a liga de titânio se encontra na forma de chapa de 0,9 mm.

O perfil de alumínio apresenta várias espessuras, sendo que a que interessa é a de 1,9 mm. Na Figura 42 pode-se ver o perfil e as duas faces que têm 1,9 mm, onde estão desenhadas a caneta preta as amostras que serão cortadas.

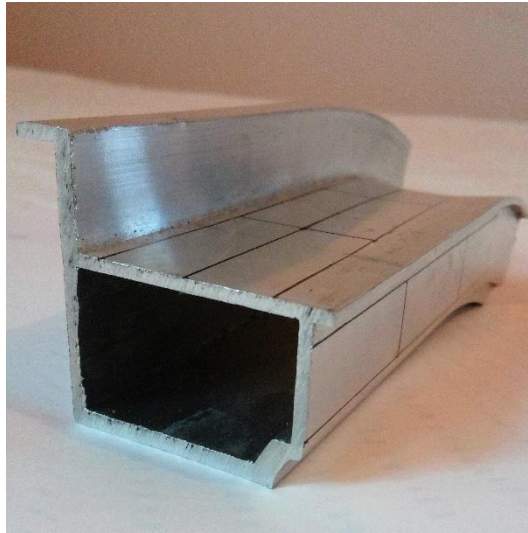


Figura 42 - Perfil industrial de alumínio

O alumínio é inicialmente cortado no serrote KASTO (Figura 43), disponível no departamento de engenharia mecânica, de maneira a se obterem chapas com espessura de 1,9 mm. Posteriormente, cortam-se as chapas na guilhotina Guifil para se obterem as amostras já com as dimensões adequadas.

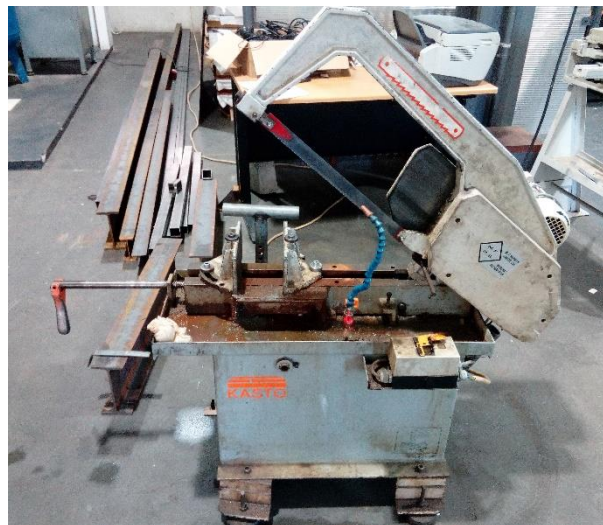


Figura 43 - Serrote KASTO

Essas amostras são depois retificadas na fresadora CNC MIKRON, onde se faz também um rasgo para posteriormente se encaixar a amostra de titânio. Este rasgo é feito com uma fresa de metal duro. Na Figura 44 está representada a ferramenta, bem como o seu posicionamento durante o corte do rasgo no alumínio.

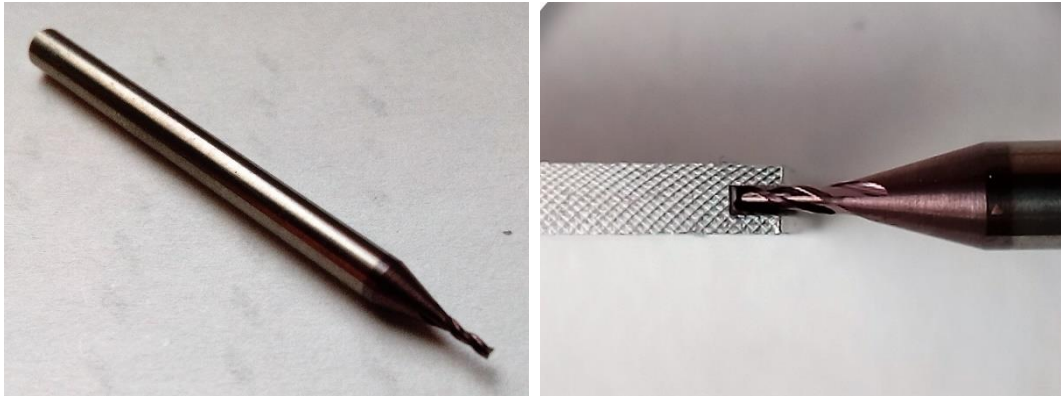


Figura 44 - Broca ARNO de metal duro

Em relação ao titânio, este é cortado na guilhotina Guifil para se obterem amostras. Cada um dos topos de todas as amostras de titânio é depois maquinado na fresadora CNC MIKRON para garantir o maior contacto possível com o alumínio e eliminar a deformação deixada pela guilhotina, tal como foi explicado anteriormente na preparação das amostras de aço *dual-phase*.

As medidas em mm das amostras maquinadas de alumínio e titânio estão representadas nas figuras 45 e 46, respetivamente.

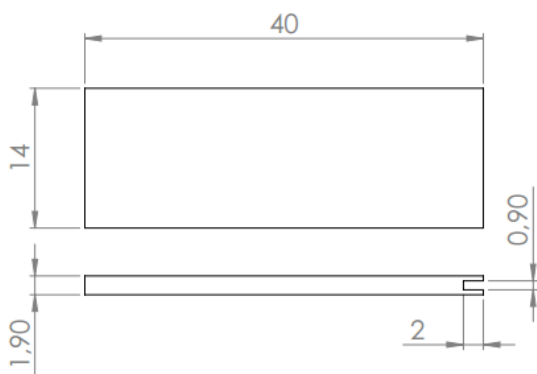


Figura 45 – Amostra de alumínio

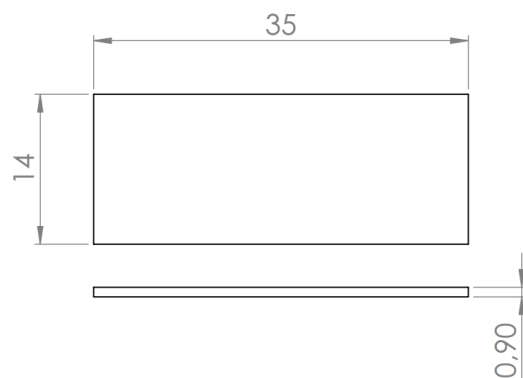


Figura 46 – Amostra de titânio

O encaixe das duas amostras está representado na Figura 47. Esta junta denomina-se junta de sobreposição dupla. Para auxiliar o encaixe do titânio no alumínio usou-se, com bastante cuidado para não danificar a junta, um martelo, pois é bastante justa a folga.

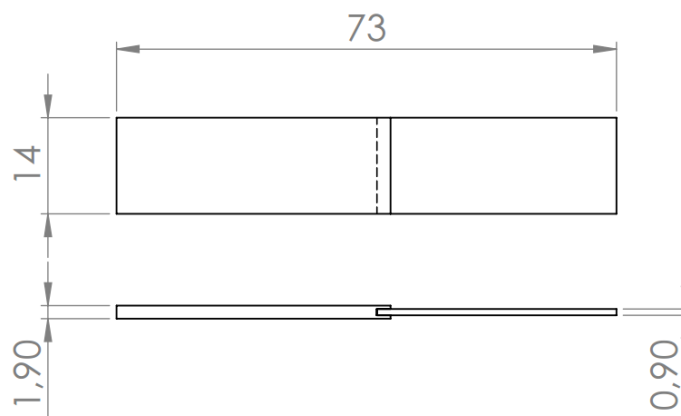


Figura 47 – Encaixe das amostras de alumínio e titânio

Para este caso de soldadura, não se usou uma junta topo a topo como aconteceu com o caso dos aços *dual-phase*, pois, devido à enorme diferença entre os pontos de fusão do alumínio e do titânio, cerca de 1000 °C, previa-se que houvesse demasiado vazamento de material causado por salpicos ou evaporação, não permitindo assim uma boa mistura de metais durante a fusão.

Uma junta de sobreposição simples também seria, de algum modo, uma solução para estes problemas. Apesar do alumínio ter um ponto de fusão muito mais baixo que o titânio, tem uma enorme reflexão face à radiação laser, necessitando assim de bastante intensidade energética. Ao mesmo tempo, essa intensidade é também capaz de fundir o alumínio. Contudo o problema seria depois nos ensaios de tração, pois como as amostras não estão alinhadas, ir-se-iam criar outras forças para além da de tração, o que seria indesejável. Considerou-se então a junta sobreposta dupla como sendo a ideal, pois neste caso as amostras já estão alinhadas. Além disso, através da transferência de calor por condução, o outro lado do alumínio também se fundiria.

3.5.2 Soldadura

Para melhor avaliar a soldadura entre o alumínio e o titânio, além de se variar os parâmetros de soldadura do laser, mudou-se também o sítio onde incide o feixe laser. O primeiro caso foi a meio da interseção das amostras (Figura 48), entre o início do alumínio e o início do titânio. O segundo caso foi alinhado com o início do titânio (Figura 49) e o terceiro caso foi no início do alumínio (Figura 50).

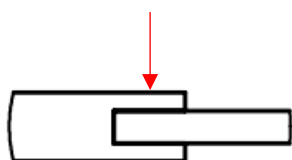


Figura 48 - Soldadura a meio da interseção

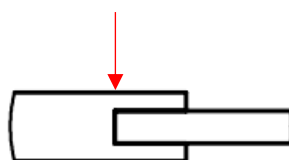


Figura 49 - Soldadura no início do titânio

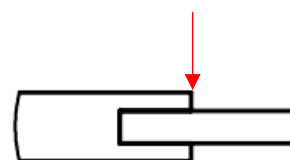


Figura 50 - Soldadura no início do alumínio

Os parâmetros de soldadura do laser foram ajustados de maneira a se obter uma soldadura visualmente boa, isto é, onde houvesse inicialmente fusão do alumínio, pois este é o primeiro a ser atingido pelo laser, e posteriormente, se desse, fusão também do titânio de maneira a que os dois metais se misturassem, mas sem que houvesse vazamento de material.

Os primeiros quatro testes serviram para descobrir qual a gama de valores de potência mais adequados, chegando-se à conclusão que é na casa dos 60%. Relativamente à largura de pulso considerou-se adequado manter em 9 ms, assim como a sobreposição a 60% e o diâmetro a 0,8 mm. A Tabela 18 apresenta os parâmetros utilizados nos vários testes.

Tabela 18 – Parâmetros de soldadura para o par alumínio - titânio

	Amostra	Potência [%]	Largura pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]
Meio interseção	1	60	9	60	0,8
	2	60	15		
	3	80	9		
	4	70	9		
	5	65	9	60	0,8
	6	63			
	7	62			
	8	61			
Início Ti	9	65	9	60	0,8
	10	66			
	11	67			
Início Al	12	60	9	60	0,8
	13	60			1,2
	14	58			1,2

3.5.3 Ensaios de tração

Para se determinar a resistência mecânica das amostras soldadas e comparar as soldaduras entre os vários parâmetros, foram realizados ensaios de tração.

Numa primeira fase, fez-se os ensaios de tração preliminares para avaliar o cordão de soldadura em termos qualitativos após a sua fratura, isto é, para verificar o que realmente acontecia na junta soldada em termos de penetração, bem como o modo como as amostras

rompiam durante o ensaio. Após cada ensaio, registava-se o valor máximo da força exercida na tração. Posteriormente, comparou-se os valores de força máxima, bem como o aspeto das soldaduras, escolhendo o melhor de cada caso. De seguida, tornou-se a repetir os ensaios de tração para esses melhores casos, procedendo-se já ao tratamento de dados.

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Shimadzu AGX 10 kN, representada na Figura 51, a uma velocidade de 1 mm/min.



Figura 51 - Shimadzu AGX 10 kN

Relativamente à área da secção dos provetes utilizado no cálculo da tensão resistente da junta, usou-se a área útil, isto é, a área onde houve efetivamente fusão de ambos os materiais, pois, como se verá mais adiante nos resultados, ao contrário do que acontece com o caso dos aços *dual-phase* onde há fusão de material em toda a largura do provete, no caso da soldadura alumínio e titânio isso já não acontece. Deste modo, após cada ensaio de tração, com um paquímetro, mediu-se o comprimento, L , da área do alumínio que foi fundido. A espessura que foi utilizada nos cálculos é a soma das duas “pernas” do alumínio em sobreposição, ou seja, 1 mm. Portanto, a área útil é $L \times 1 \text{ mm}^2$.

De facto, numa primeira fase tentou-se maquinar os provetes de Al - Ti da mesma forma daqueles de DP1000 - DP600 (Figura 38). No entanto, devido à baixa resistência da junta, como mais à frente se verá, e à maior dificuldade de fixação do provete na fresadora, tal não foi possível.

Para além dos provetes soldados, foram testados também provetes de alumínio AA6060 T6 e AA6060 sem tratamento térmico, para comparar os resultados.

Para se obter o alumínio sem o tratamento térmico T6, efetuou-se um tratamento de recristalização. Para tal, usou-se o forno de tratamento térmico Termolab (Figura 52). As amostras de alumínio estiveram no forno durante 3h a uma temperatura de 420 °C [41].

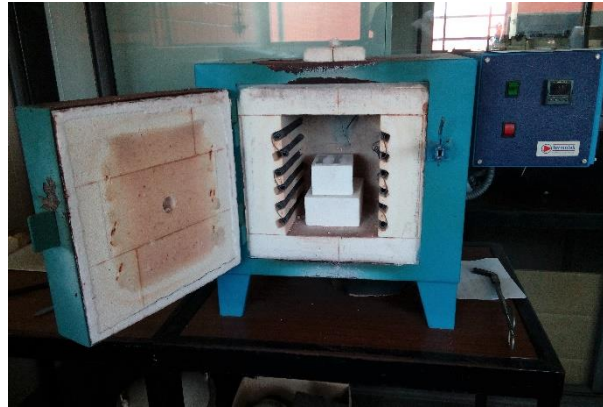


Figura 52 - Forno de tratamento térmico Termolab

4 Resultados


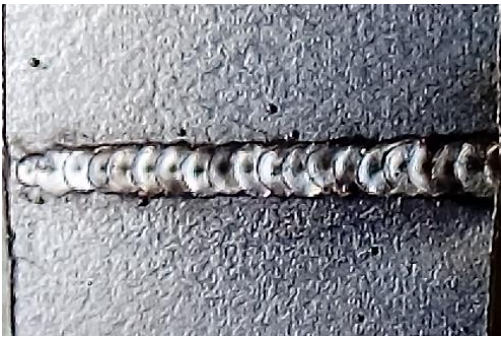


4.1 Soldadura DP600 - DP1000





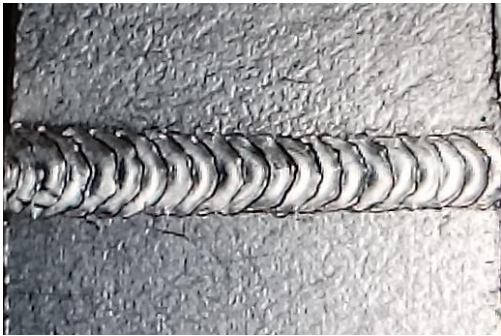

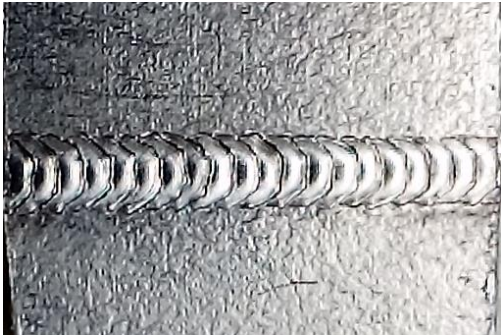

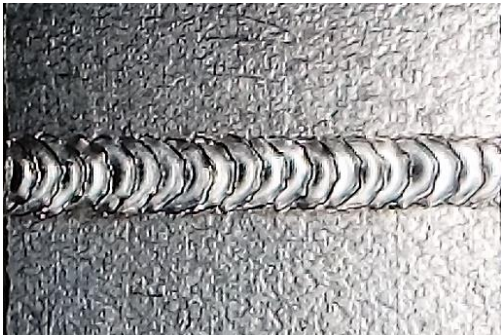

Com o objetivo de se encontrar uma boa soldadura entre os aços *dual-phase* 600 e 1000, foram realizados vários testes de soldadura, seguido de ensaios de tração para avaliar algumas propriedades mecânicas dos provetes.

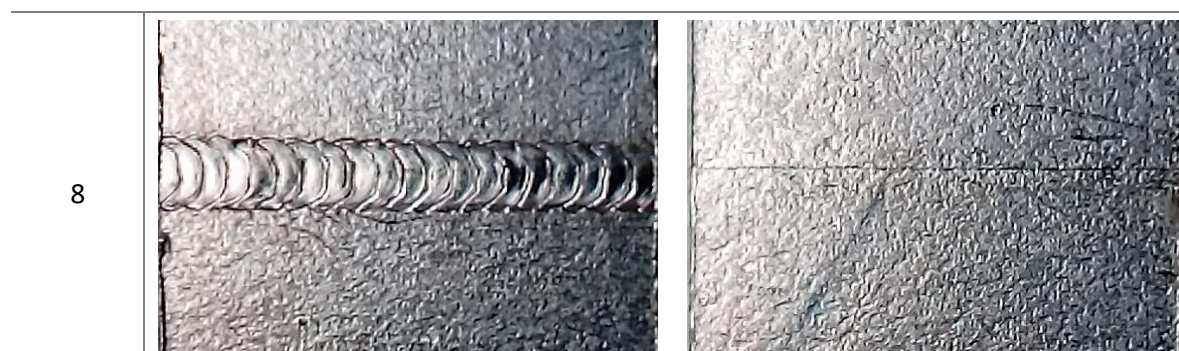
Relativamente aos parâmetros do laser, foram mantidos constantes a potência a 50%, a sobreposição a 60% e o diâmetro do feixe laser a 1,2 mm. A largura de pulso foi o parâmetro variável, com os valores de 12 ms a 5 ms, obtendo-se assim um total de 8 provetes diferentes. Para cada parâmetro, foram repetidos três provetes.

Nas imagens que se seguem (Tabela 19) pode-se ver o cordão de soldadura de ambos os lados de cada provete em todo o comprimento de 14 mm. As imagens estão dispostas de maneira a que o feixe laser incida da esquerda para a direita.

Tabela 19 - Resultados da soldadura nos aços *dual-phase*

Amostra	Vista superior	Vista inferior
1		
2		

3		
4		
5		
6		
7		



Tal como se pode observar nas imagens da tabela, os cordões de soldadura da vista de cima de todos os provetes apresentam praticamente o mesmo aspeto. A diferença está na parte inferior, onde se pode ver que à medida que a largura de pulso diminui, a penetração total da soldadura começa mais tarde. No último provete, que corresponde ao caso com a largura de pulso mais baixo, há apenas penetração parcial. Este fenómeno da penetração ir aumentando ao longo do cordão acontece porque, à medida que o material vai sendo soldado, vai também sendo aquecido, tornando-o mais “macio” e, assim, facilitando o processo de soldadura e permitindo maiores penetrações.

Apesar de se estar a soldar dois aços, é relevante salientar a qualidade visual dos cordões de soldadura entre dois aços dissimilares, nomeadamente a ausência de salpicos, mordeduras e abatimento de cordão praticamente inexistente.

4.1.1 Ensaios de tração

Nas tabelas que se seguem são mostrados os resultados dos ensaios de tração. O objetivo destes ensaios é perceber de que maneira a deformação plástica se vai manifestar, bem como analisar a resistência da junta soldada.

As primeiras duas tabelas dizem respeito aos materiais DP1000 e DP600 (só metal base, sem qualquer soldadura), enquanto que as tabelas 22 a 29 apresentam os resultados de um provete representativo das amostras 1 a 8, respetivamente.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração da amostra de DP1000

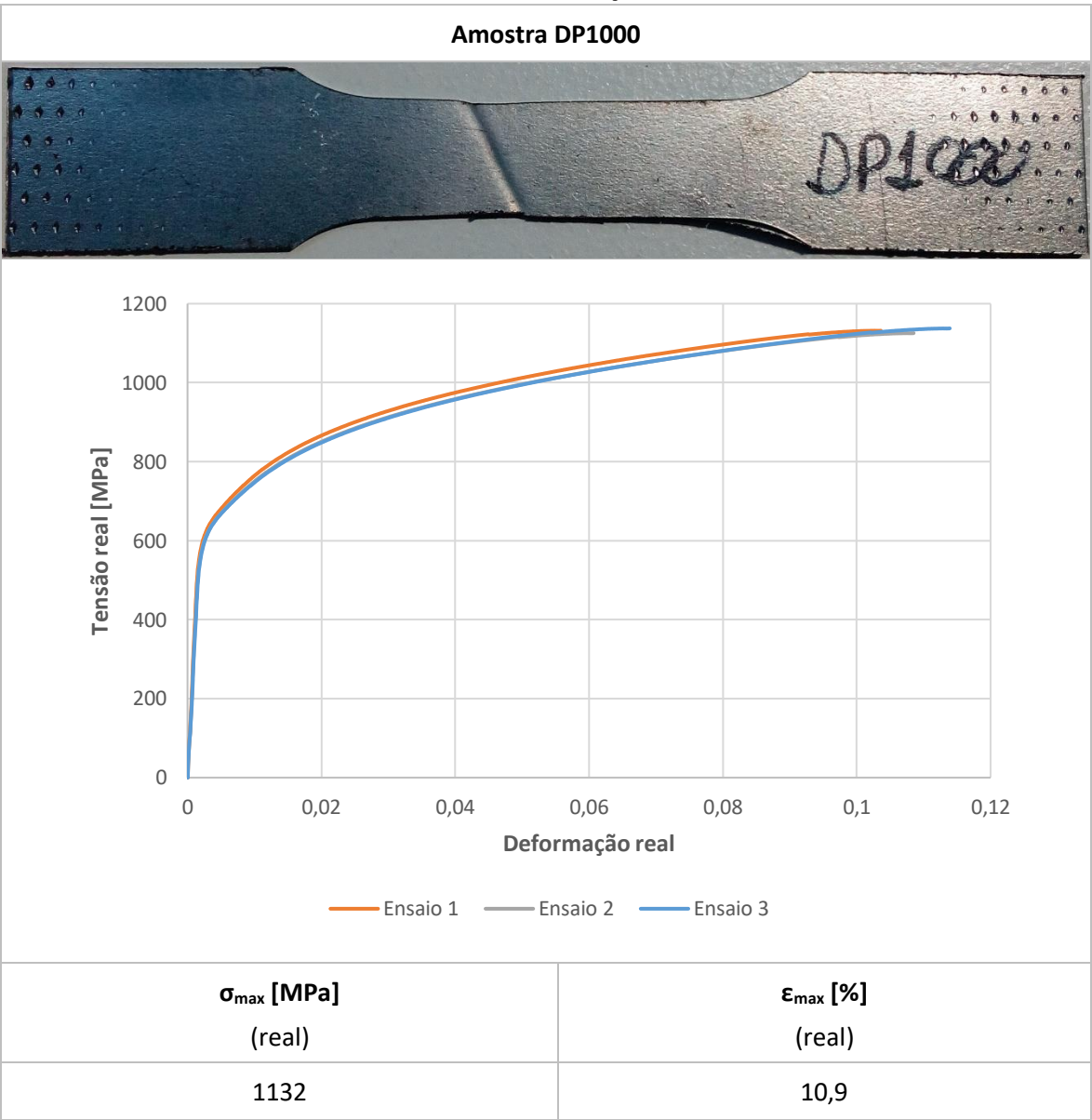


Tabela 21 - Resultados do ensaio de tração da amostra de DP600

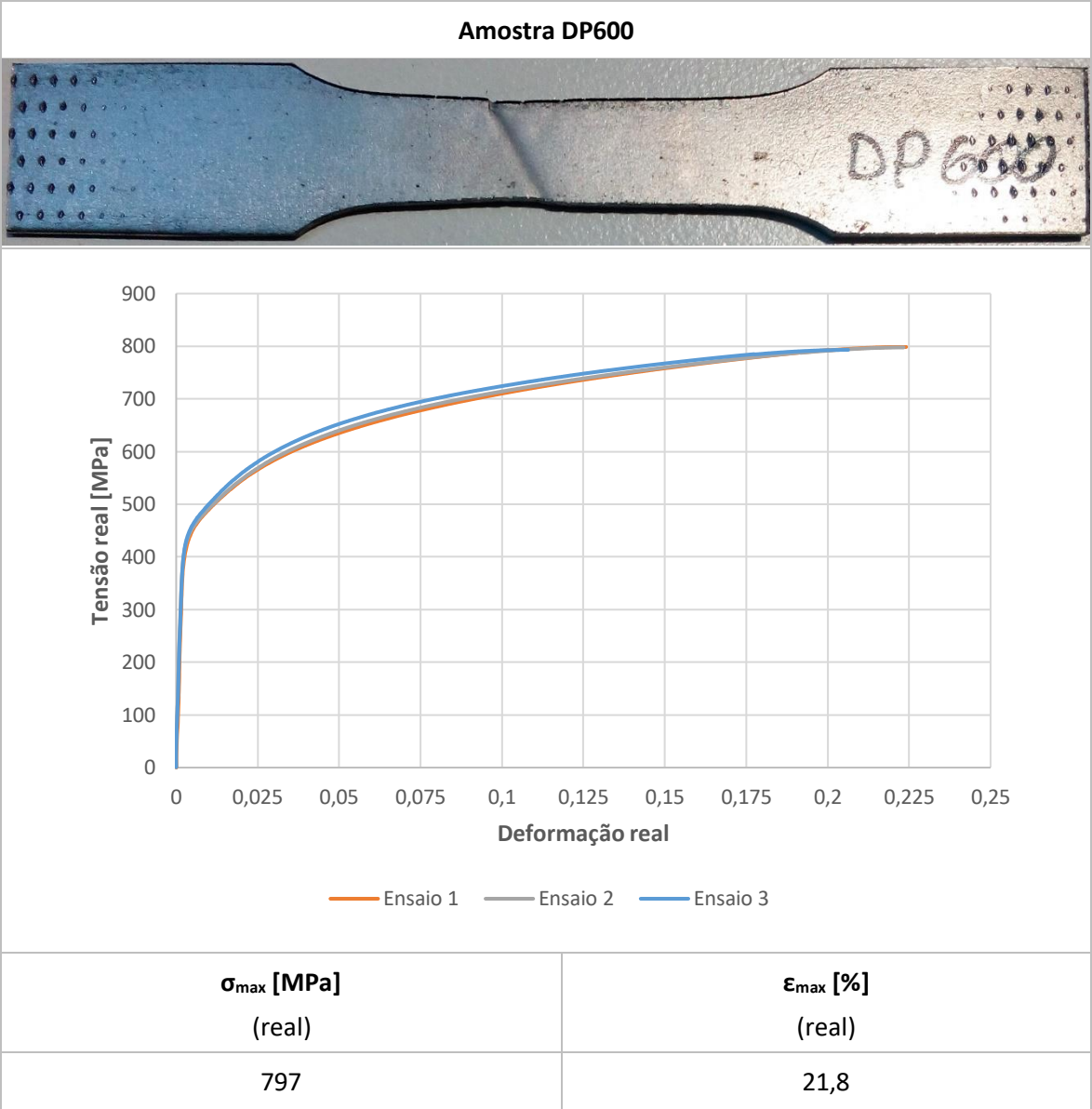


Tabela 22 – Resultados do ensaio de tração da amostra 1

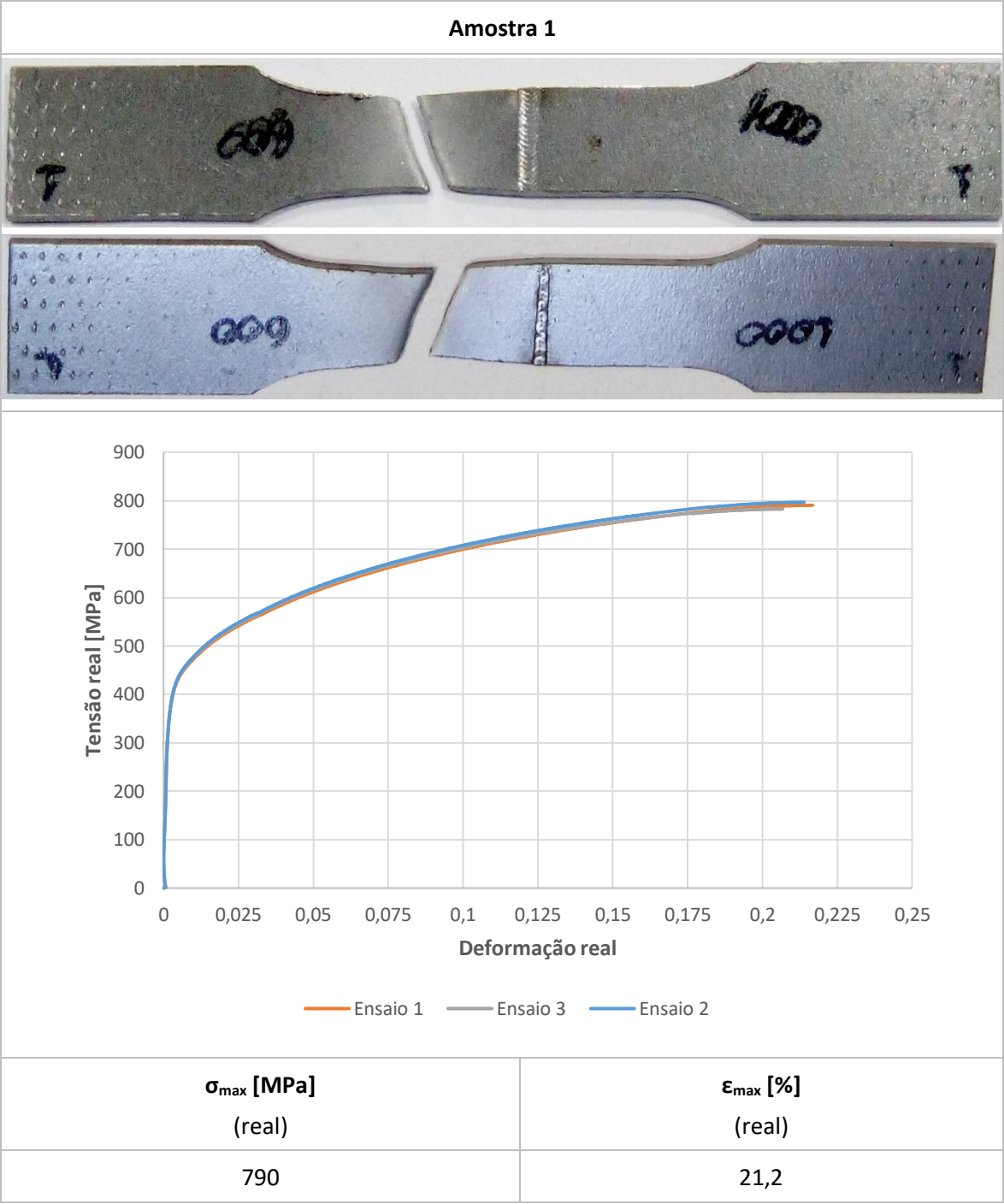


Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração da amostra 2

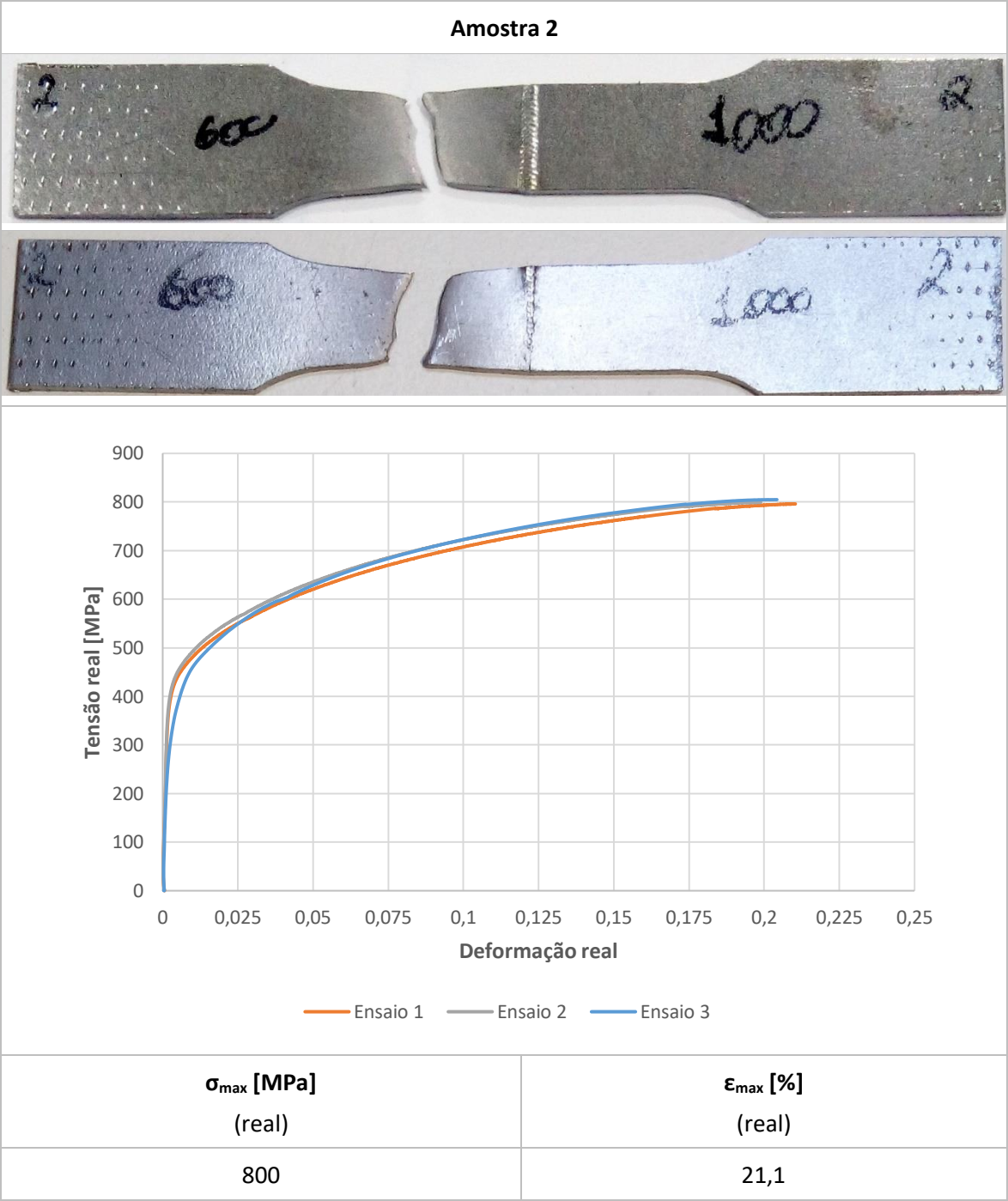


Tabela 24 – Resultados do ensaio de tração da amostra 3

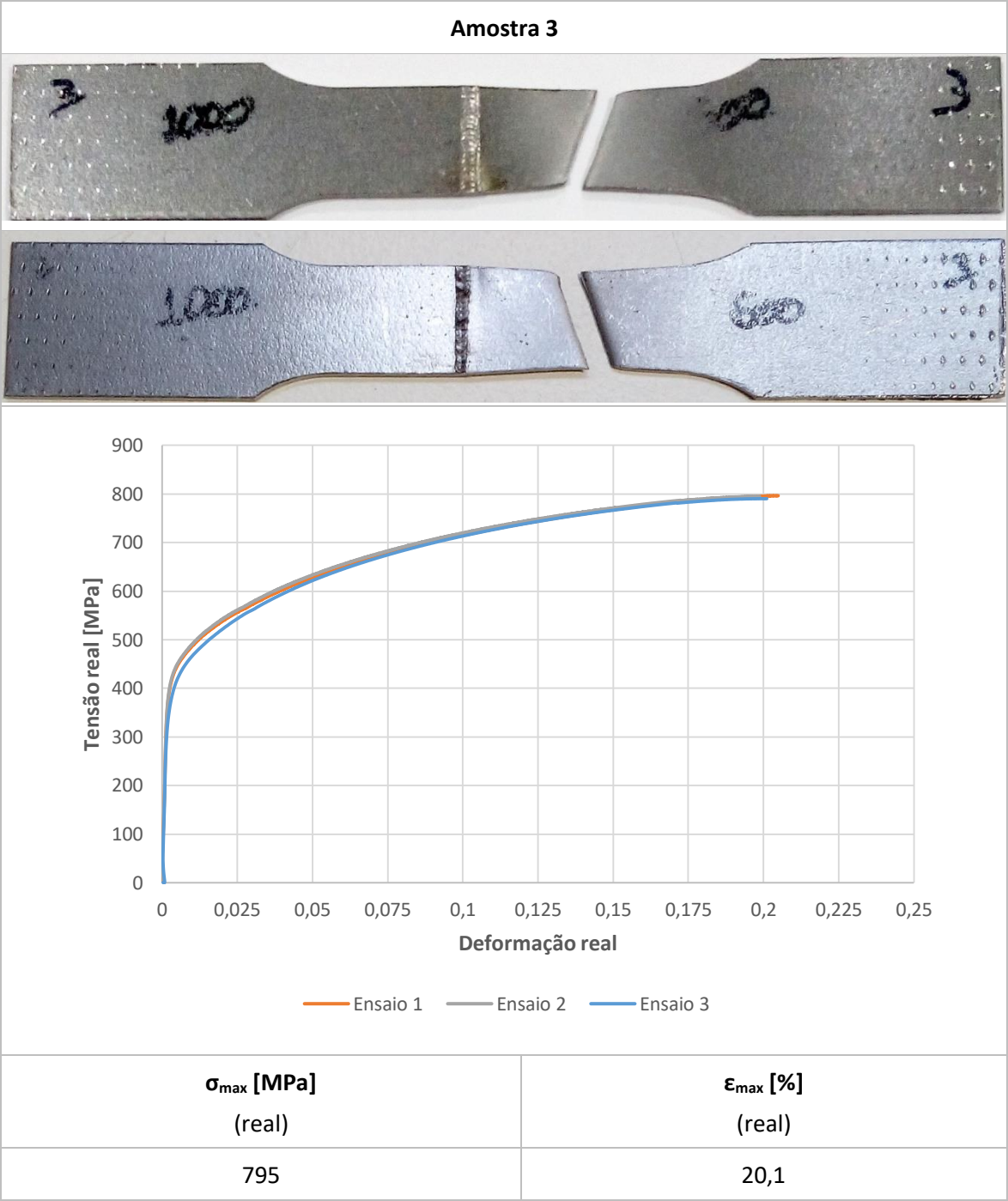


Tabela 25 – Resultados do ensaio de tração da amostra 4

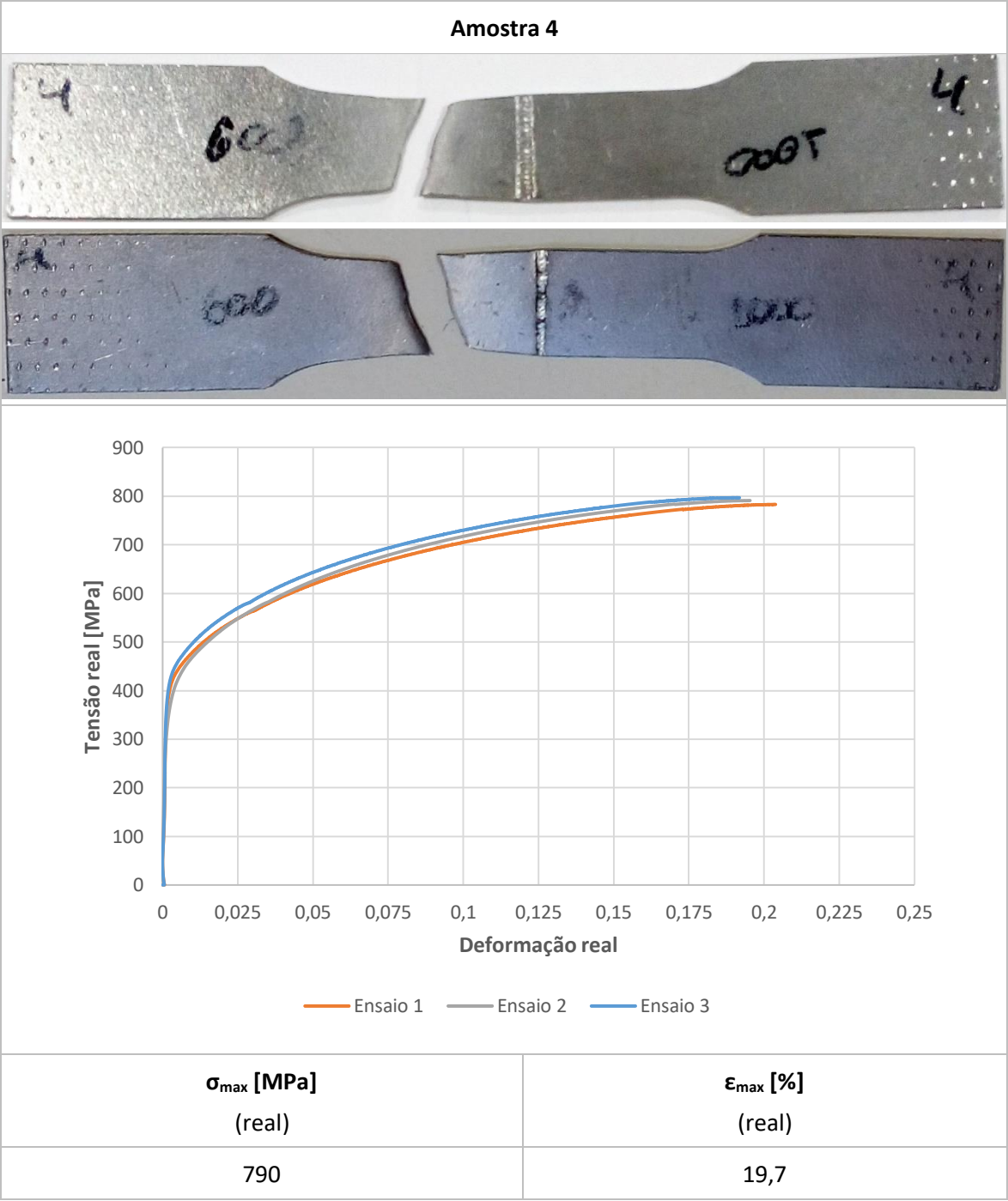


Tabela 26 – Resultados do ensaio de tração da amostra 5

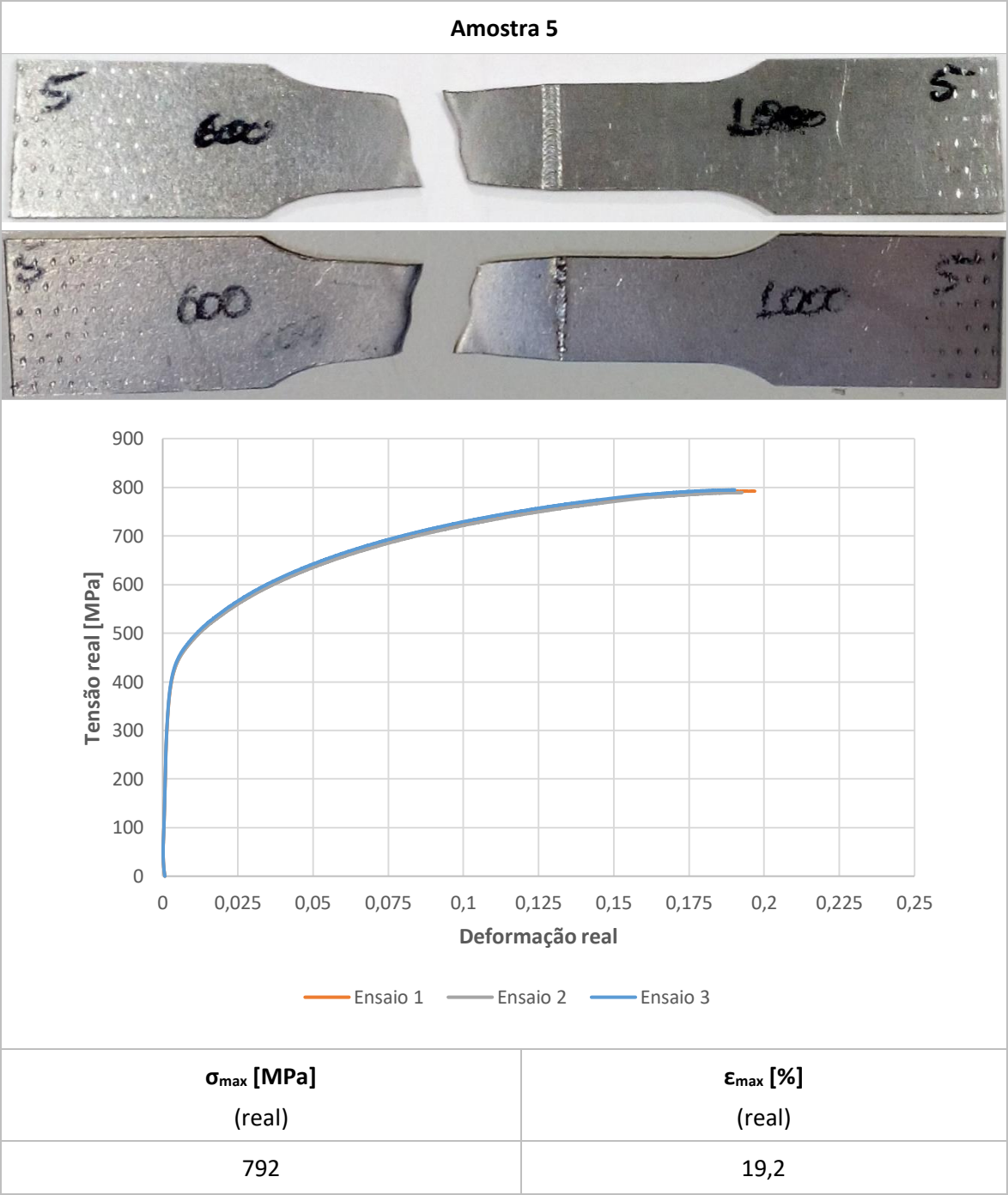


Tabela 27 – Resultados do ensaio de tração da amostra 6

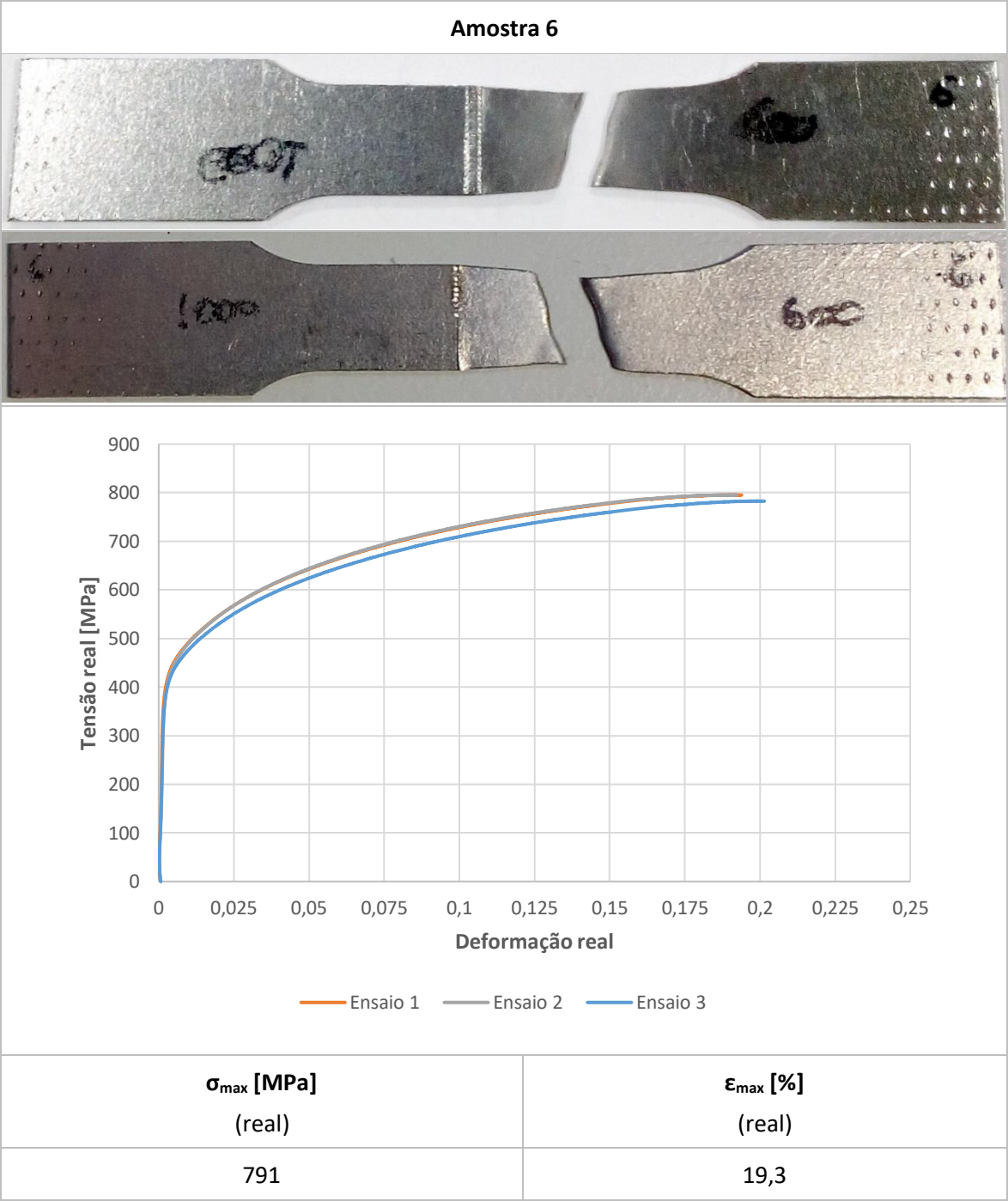


Tabela 28 – Resultados do ensaio de tração da amostra 7

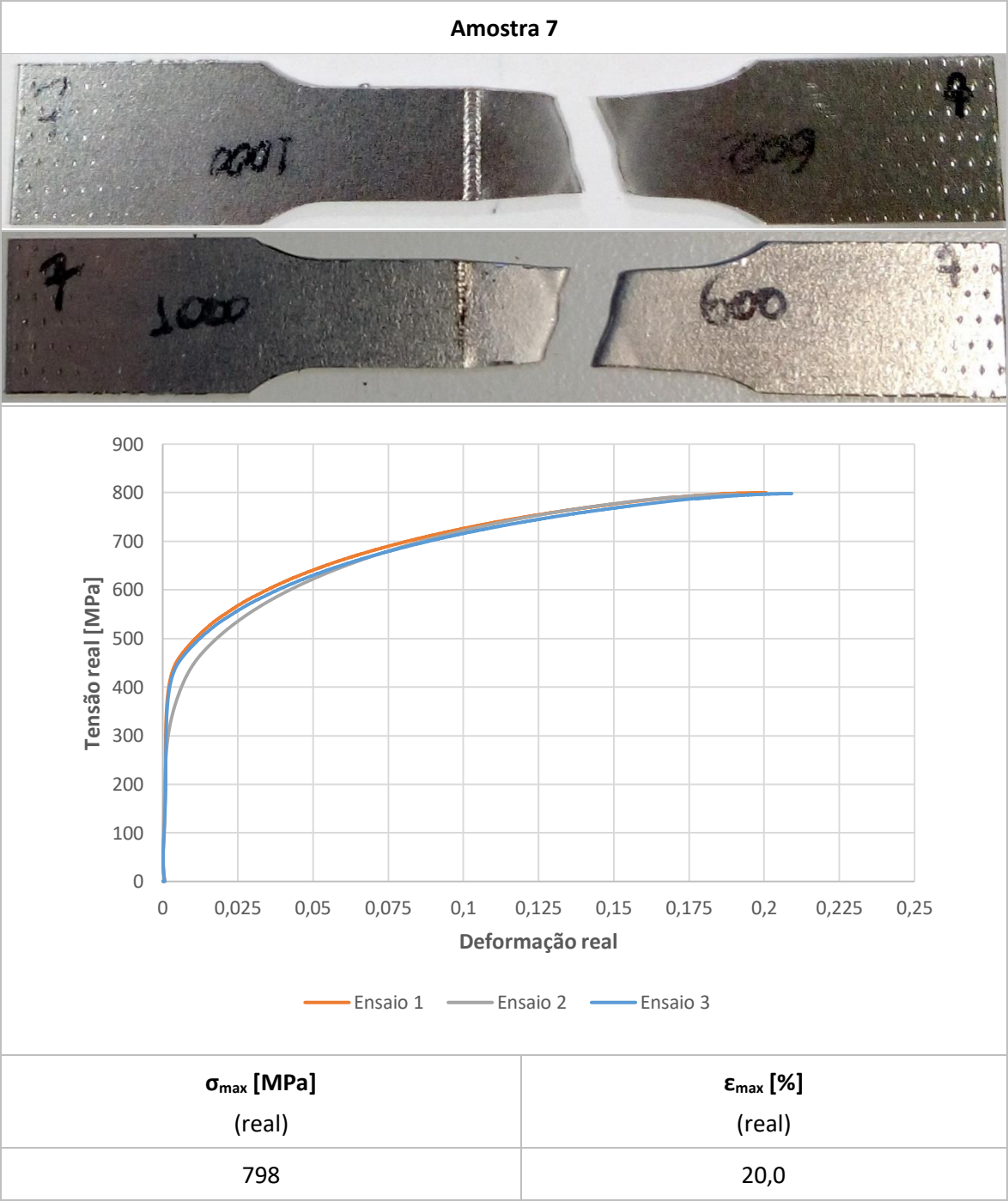
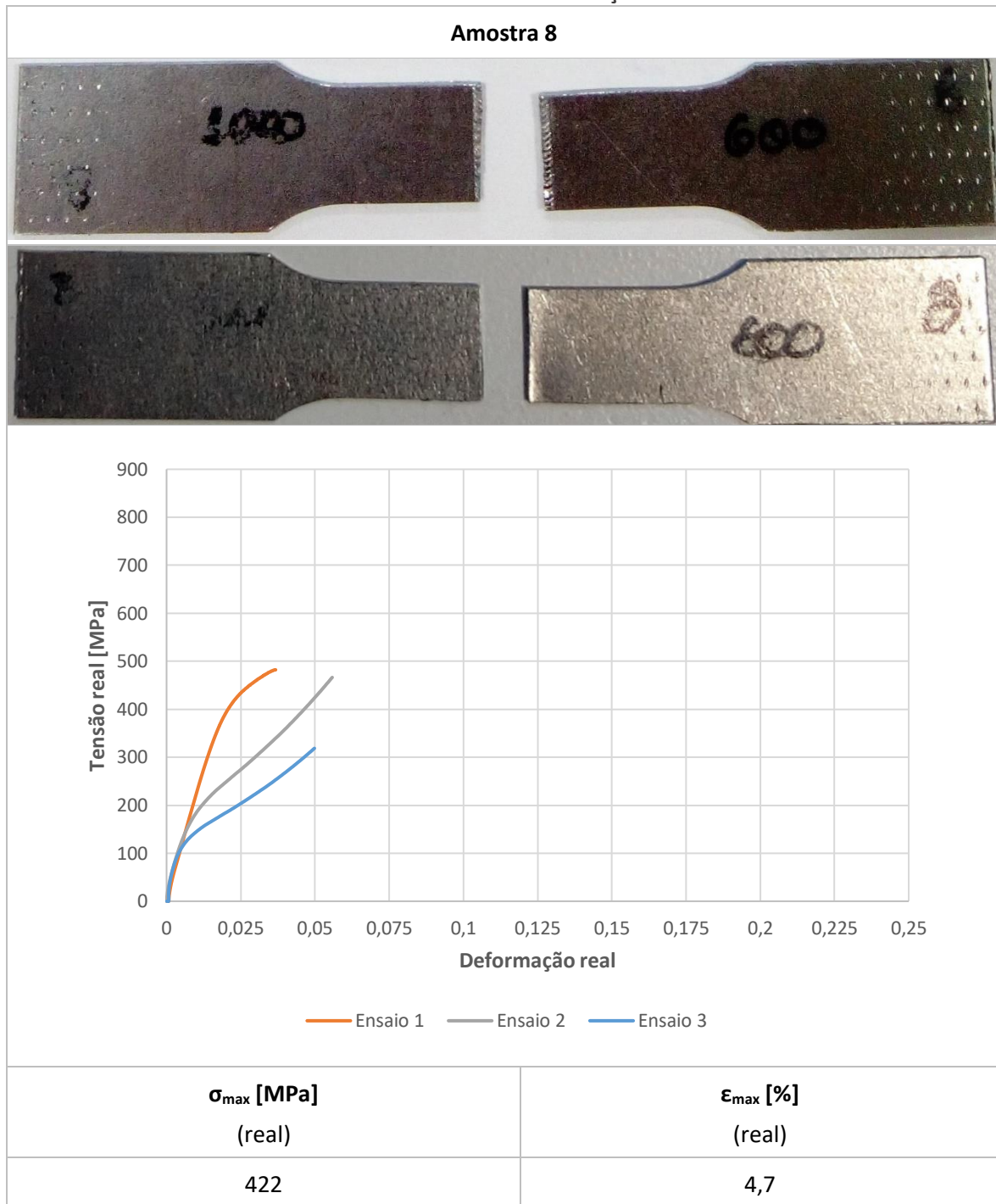


Tabela 29 – Resultados do ensaio de tração da amostra 8



Tal como se pode observar, apenas o último provete, que não teve penetração total, partiu pelo cordão de soldadura. Os restantes partiram a uma certa distância do cordão e aparentemente afastados da zona termicamente afetada, o que indica que a soldadura alterou termicamente as características mecânicas do aço, melhorando a sua resistência. Mesmo o provete 7 que obteve apenas penetração total a meio do cordão, não rompeu pela junta.

Relativamente aos valores de tensão e deformação reais, não há grandes discrepâncias entre os provetes que obtiveram penetração total. A grande diferença está, naturalmente, no provete 8 que partiu pelo cordão de soldadura e que, consequentemente, obteve os valores mais baixos.

As figuras 53 e 54 apresentam o resumo dos valores da tensão e deformação reais obtidos em todas as amostras, respetivamente.

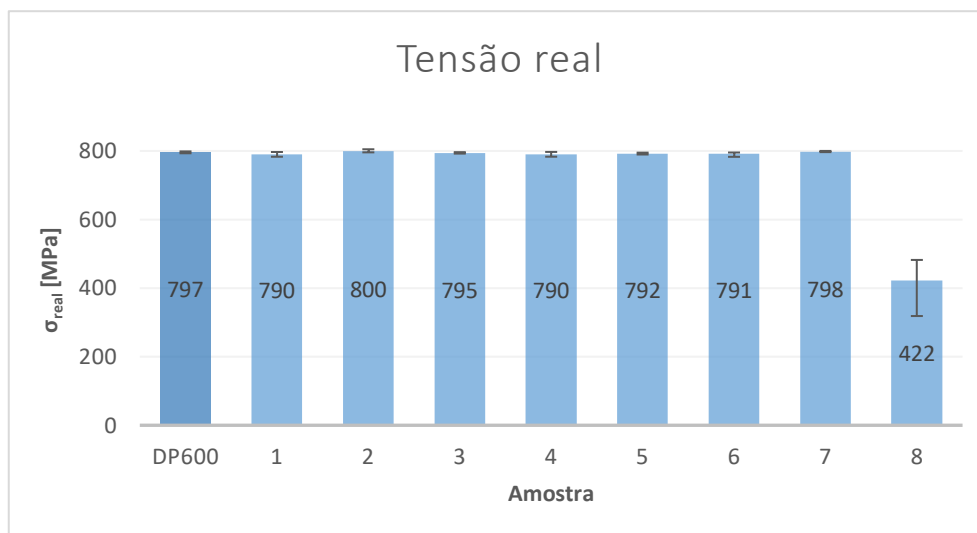


Figura 53 – Resumo dos valores da tensão real

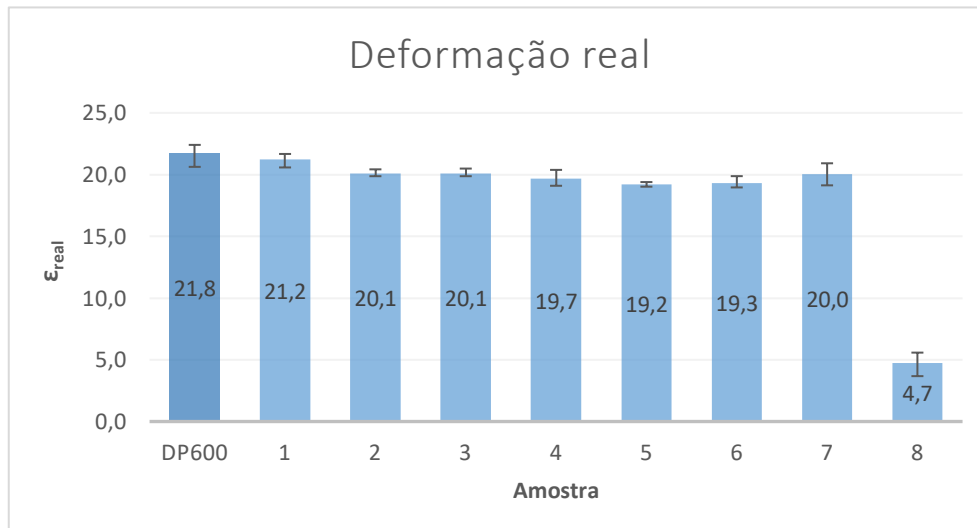


Figura 54 – Resumo dos valores da deformação real

Sendo os materiais soldados os aços DP1000 e DP600 com resistências à tração de 1132 e 797 MPa, respetivamente, esperava-se que os provetes partissem pelo lado que tem o aço com menor resistência, o DP600. Como se pode verificar pelas fotografias acima, foi isso que aconteceu. As Figuras 53 e 54 demonstram também que os valores máximos de tensão e deformação obtidos nos ensaios de tração são bastantes próximos dos valores do aço DP600 (metal base).

4.1.1.1 Aramis

As seqüências de imagens que se apresentam mostram a deformação real obtida pelo *software* ARAMIS ao longo do tempo.

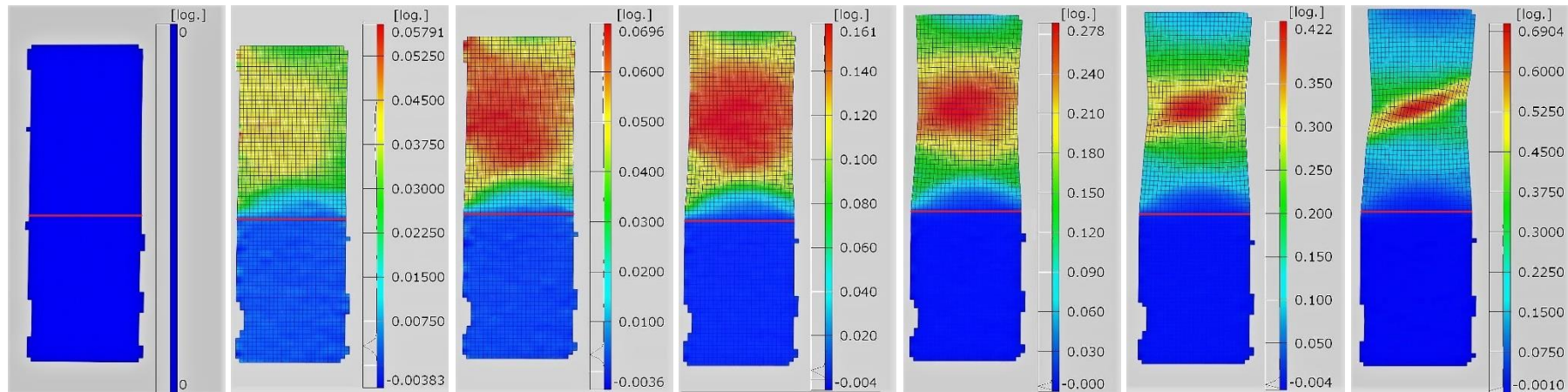


Figura 55 - Representação da deformação real ao longo do comprimento, ε_y

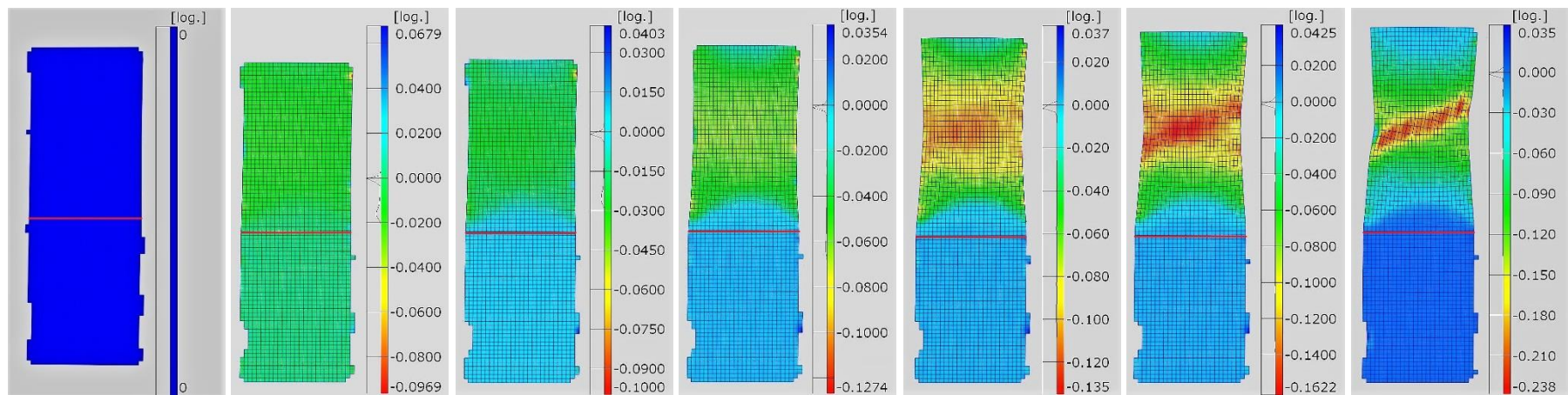


Figura 56 - Representação da deformação real ao longo da largura, ε_x

O ensaio de tração usando o ARAMIS foi feito no provete que corresponde ao número 5, pois é o que usa menos energia e que ao mesmo tempo garante penetração total. Durante o ensaio de tração, o *software* ARAMIS recolheu 300 imagens à cadência de 3/s. Para a Figura 55 e Figura 56 seleccionou-se sete, sendo que a primeira corresponde ao momento antes do provete começar a ser tracionado e a última ao momento exato antes de se partir. A linha vermelha horizontal representa o cordão de soldadura. A parte inferior do provete corresponde ao DP1000 e a parte superior ao DP600. Para a análise à deformação que se irá fazer seguidamente, o provete foi dividido em três áreas, conforme a Figura 57.

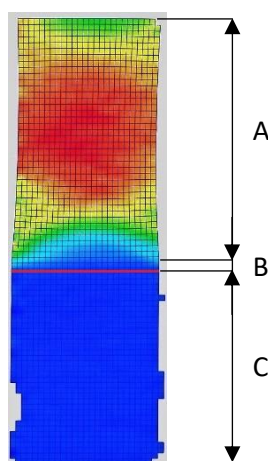


Figura 57 - Divisão do provete em três zonas de análise

O primeiro aspeto que se repara é a frente de deformação curva que se forma na zona termicamente afetada do lado do aço DP600. Tal como se viu anteriormente, a soldadura melhorou as propriedades mecânicas desta zona pois o aço fratura sempre acima da ZTA, apesar de na linha do cordão de soldadura haver um inevitável, embora muito ligeiro, abatimento.

Outro aspeto relevante é o facto de não haver alterações significativas do lado do aço DP1000 (Figura 57 - zona C) como demonstra a sequência de imagens apresentada na Figura 55. Apesar de haver uma pequena deformação, esta ocorre de forma uniforme em toda a zona da amostra que corresponde ao DP1000. Note-se que, após o início da estrição do DP600, o aço DP1000 diminuiu um pouco a sua deformação. Isto é patente no final do gráfico da Figura 58, que apresenta as deformações médias longitudinais e transversais em função do tempo no DP1000. Atendendo que a tensão de rutura do DP600 é cerca de 700 MPa e a tensão de cedência do DP1000 é 500, era natural que o DP1000 deformasse um pouco plasticamente. Naturalmente, a partir da zona de estrição a força que estica o provete em tração vai diminuindo, pelo que a componente elástica da deformação é devolvida à área do DP1000, decrescendo o valor total, facto aqui perfeitamente

visível. Ainda assim, após rutura, a área do DP1000 permanece com uma deformação plástica longitudinal, ϵ_y , e transversal, ϵ_x , de cerca de 0,3% e 0,1%, respetivamente (Figura 58).

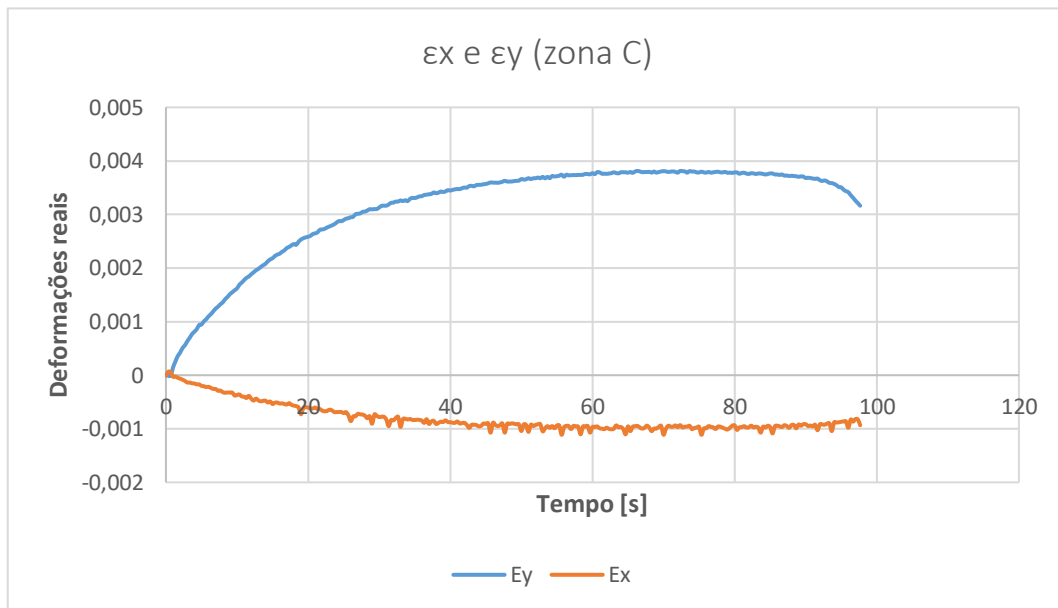


Figura 58 - Deformações reais na zona C ao longo do tempo

A Figura 59 apresenta as deformações médias na zona do DP600 (Figura 57 - zona A) ao longo do tempo. Naturalmente, tal como era expectável, neste caso as deformações, tanto a longitudinal como a transversal, são sempre crescentes até à rutura.

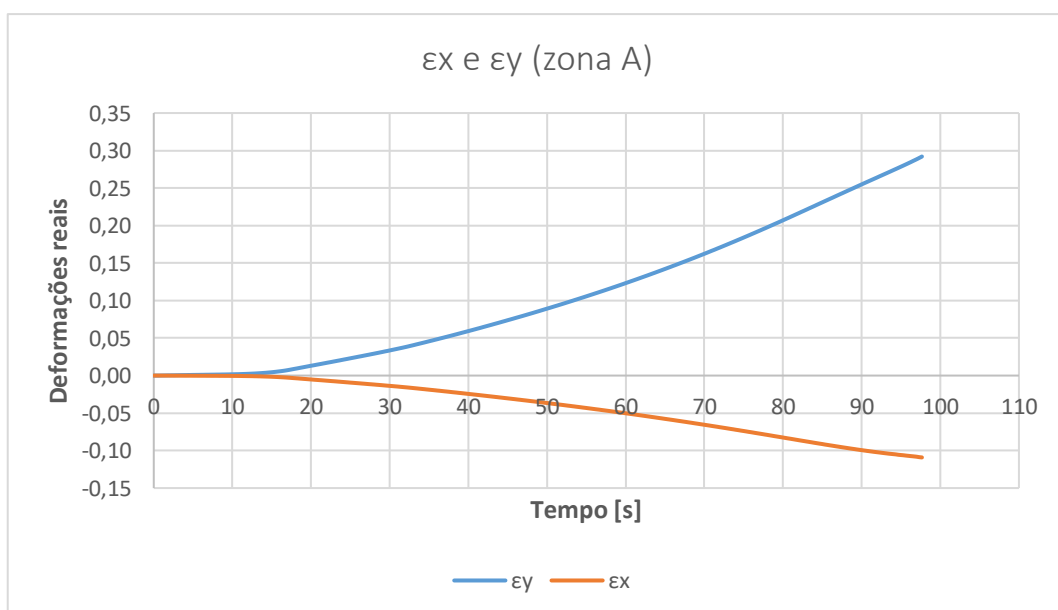


Figura 59 - Deformações reais na zona A ao longo do tempo

O gráfico das deformações na zona do cordão de soldadura (Figura 57 - zona B) encontra-se representado na Figura 60. Apesar de haver um esperado ligeiro aumento de deformação em relação ao DP1000, o cordão apresenta um comportamento bastante semelhante a este. Após se dar a tensão de rutura do provete, a deformação do cordão diminui ligeiramente pelas mesmas razões antes expostas.

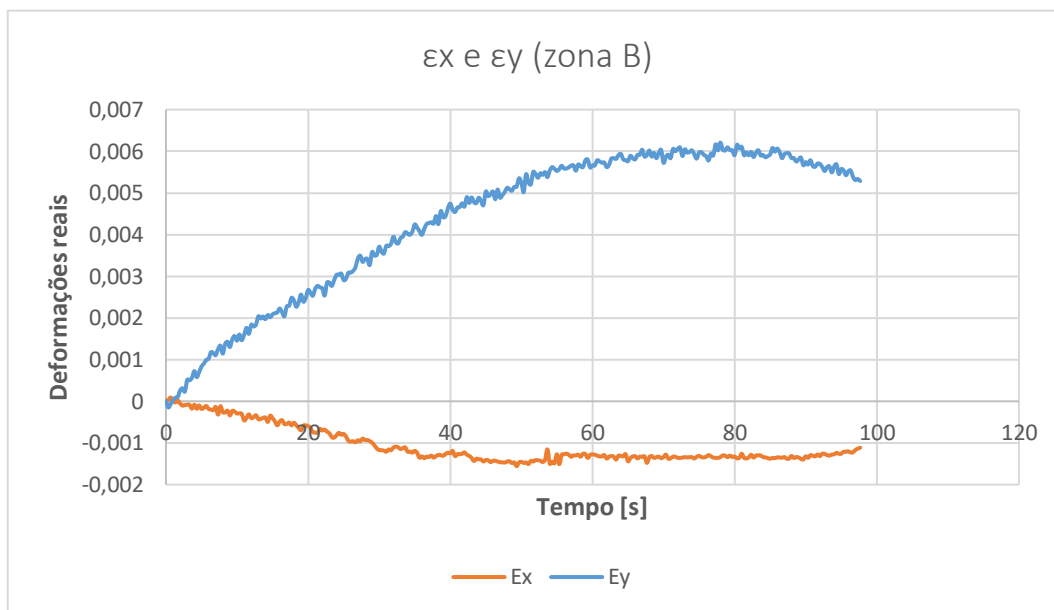


Figura 60 - Deformações reais ao longo do tempo na zona B

As Figuras 61, 62 e 63 apresentam os gráficos tensão real - deformação real para as três áreas A, B e C, respetivamente.

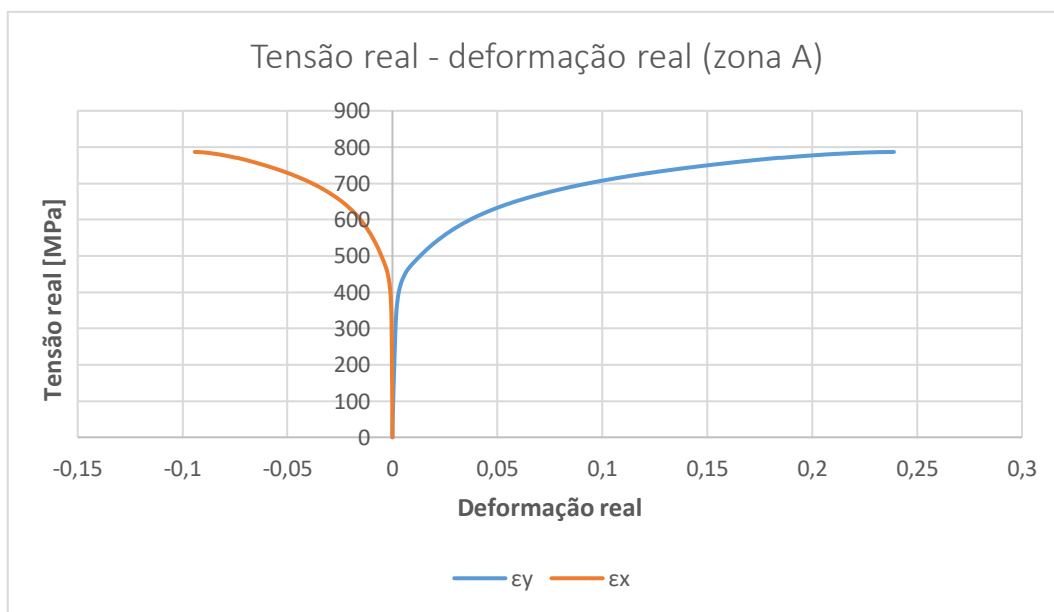


Figura 61 - Tensão real em função da deformação real na zona A

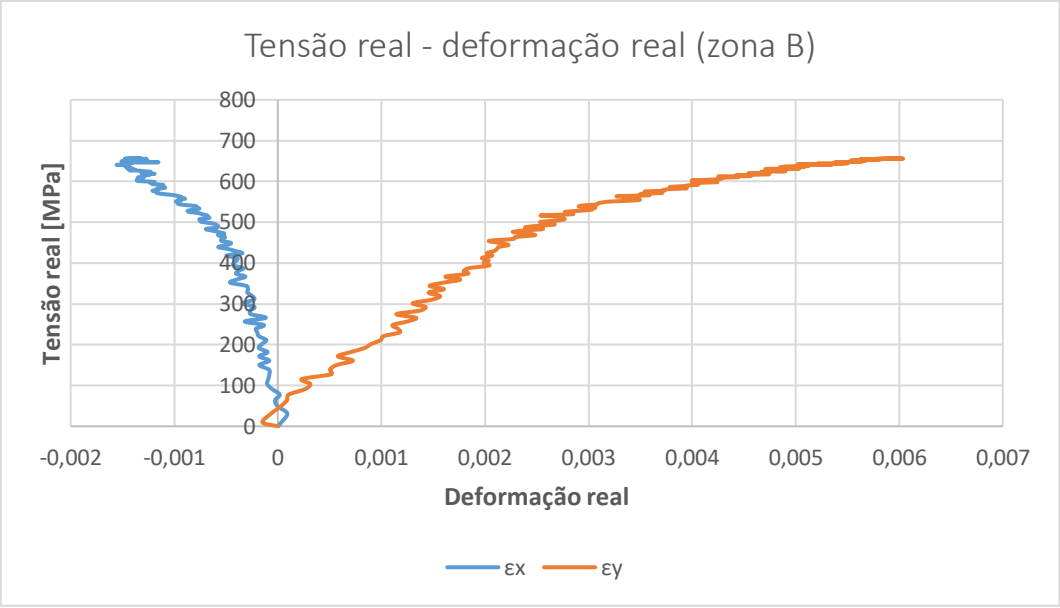


Figura 62 - Tensão real em função da deformação real na zona B

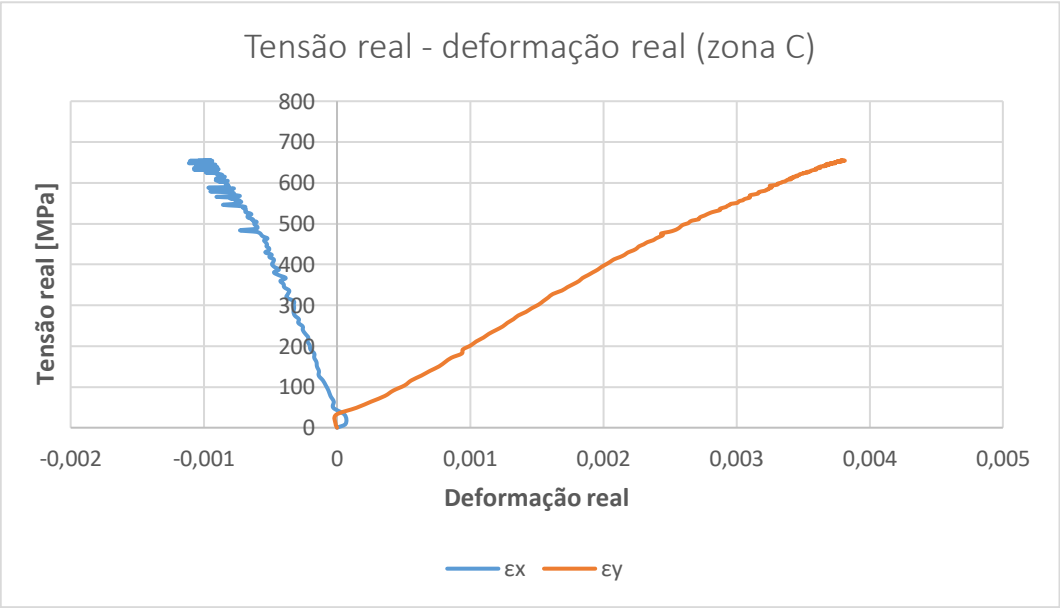


Figura 63 - Tensão real em função da deformação real na zona C

4.2 Soldadura Alumínio - Titânio

Com o objetivo de se encontrar uma boa soldadura entre as ligas de alumínio e titânio foram realizados vários testes de soldadura, onde se variaram os parâmetros do laser, assim como o local de incidência do feixe nas amostras.

Inicialmente foram feitos ensaios de tração preliminares de modo a avaliar e escolher a melhor amostra soldada para cada caso. De seguida procedeu-se à realização dos ensaios de tração e tratamento de dados para esses melhores casos.

4.2.1 Alumínio AA6060

Para se comparar os resultados e melhor avaliar a resistência mecânica das juntas soldadas, foram testados provetes (dois de cada) de alumínio AA6060 T6 e AA6060 sem tratamento térmico.

Na Figura 64 são apresentados os gráficos da tensão real em função da deformação real para os quatro provetes testados.

A tensão real máxima média para o alumínio AA6060 T6 é 222 MPa, enquanto que para o alumínio sem tratamento térmico é 116 MPa.

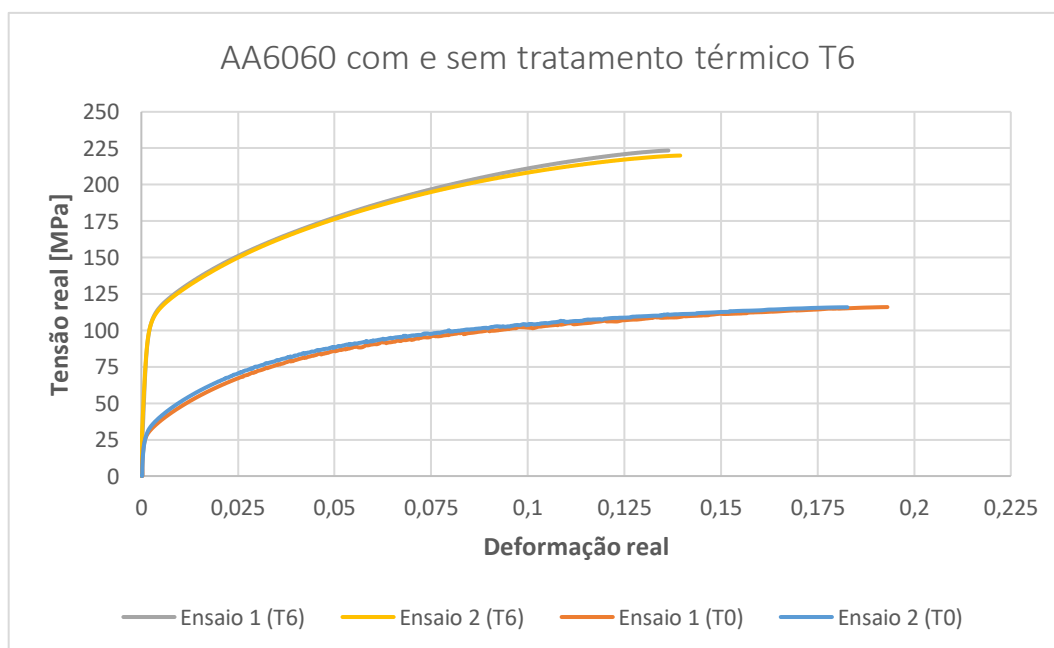


Figura 64 - Tensão real - deformação real de AA6060







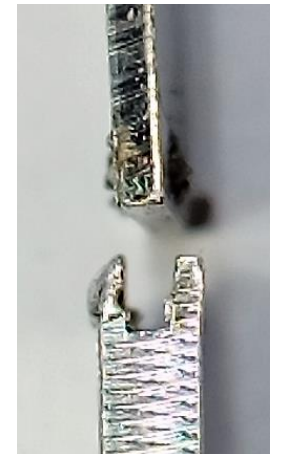
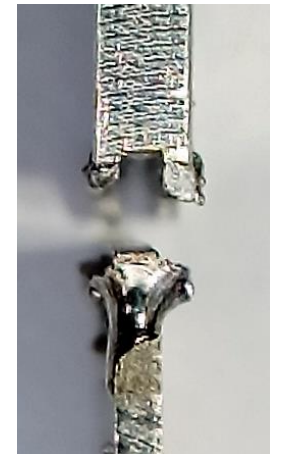
4.2.2 Ensaios preliminares

As imagens dos resultados estão expostas nas tabelas que se apresentam seguidamente. A primeira tabela tem duas linhas de imagens, sendo que a primeira corresponde às amostras após terem sido soldadas e a segunda linha às amostras após os ensaios de tração. Os ensaios de tração foram realizados após as várias soldaduras de cada caso. Entende-se “Parte superior” como a parte onde o feixe atingiu diretamente a amostra e “Parte inferior” pela parte oposta. Em ambas as imagens a soldadura foi feita de baixo para cima. “Parte lateral início” corresponde à vista lateral da amostra do sítio onde o feixe laser incide inicialmente e “Parte lateral fim” corresponde ao local onde termina a soldadura. Nestas duas últimas imagens, o feixe laser incidiu da esquerda para a direita. A segunda tabela apresenta as amostras de alumínio e titânio separadas, vistas pelo lado da junta e após o ensaio de tração.



4.2.2.1 Soldadura a meio da interseção da junta

O primeiro caso estudado da soldadura de alumínio e titânio foi com o feixe laser a incidir no meio da interseção de ambos os materiais. Foram soldadas quatro amostras, tendo-se mantido constante a largura de pulso a 9 ms, a sobreposição a 60% e o diâmetro do feixe a 0,8 mm. Apenas foi variada a potência com os valores 65%, 63%, 62% e 61%.

Soldadura Al - Ti: amostra 5

Tabela 30 - Resultados da amostra 5			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

(a) - titânio fundido

Tabela 31 - Resultados da amostra 5	
Alumínio	Titânio
	

Os resultados da primeira amostra, com a potência a 65%, são apresentados na Tabela 30 e na Tabela 31. Tal como se pode observar na parte superior da amostra, o cordão de soldadura apresenta dois aspetos bastantes distintos. Inicialmente o cordão tem uma forma uniforme com uma largura ligeiramente maior que o diâmetro do feixe laser e não há qualquer projeção de material. Passado um pouco o cordão torna-se bastante irregular e com bastantes salpicos, havendo um aumento claro da largura do banho de fusão de material, como se a potência do laser e a largura do feixe tivessem sido aumentados. Este facto acontece, pois, à medida que o material vai sendo soldado, vai também aquecendo mais, tornando-o mais “macio” e, deste modo, facilitando o processo de soldadura, permitindo maiores penetrações. Naturalmente, sabendo que o alumínio é um excelente condutor térmico, este fenómeno é muito mais expressivo do que já se revelava no caso DP1000-DP600. Este efeito ocorre em bastantes amostras, tal como se verá mais adiante.

Nesta última parte da soldadura, que corresponde a cerca de dois terços do cordão, para além de haver penetração total do alumínio e do titânio, há também fusão completa do alumínio do lado oposto, proveniente da transferência de calor. Na imagem da “Parte inferior” e da “Parte lateral fim” é possível ver-se de forma clara o efeito descrito.

As Tabelas 30 e 31 mostram que no ensaio de tração, a fratura se deu pelo alumínio, tendo o titânio ficado intacto. Na Tabela 31 vê-se de forma clara que o material de alumínio que está em falta na amostra, cerca de dois terços da largura total, está na amostra de titânio. É provável que o titânio tenha fundido na área onde tem alumínio agarrado e, claramente, isso aconteceu no final do cordão.

Soldadura Al - Ti: amostra 6







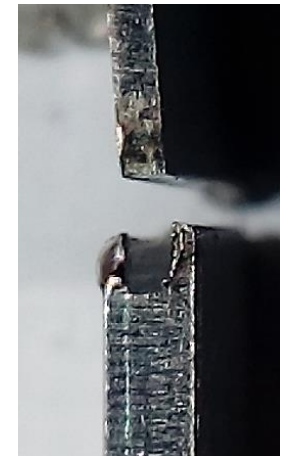

Tabela 32 - Resultados da amostra 6			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 33 - Resultados da amostra 6	
Alumínio	Titânio
	

Na amostra seguinte diminuiu-se a potência em dois pontos percentuais, para 63%, pois tal como já foi dito, inicialmente considerou-se indesejável a existência de projeções de alumínio que ocorreu na amostra anterior. O objetivo era conseguir um cordão regular do início ao fim e capaz de fundir o alumínio e o titânio. Posteriormente, virava-se a amostra e tornava-se a soldar com os mesmos parâmetros.

Contudo, como se pode ver na Tabela 32, também aqui surgiram salpicos de alumínio, apesar de este efeito ter acontecido apenas no fim. Cerca de três quartos da amostra foi soldada com um cordão regular, havendo apenas no fim fusão também da parte de trás, tal como se pode ver em “Parte inferior”. Uma vez que o cordão não foi regular e houve alguma penetração total, a amostra não foi soldada pelo lado inverso.

Após o ensaio de tração, verificou-se que, tal como anteriormente, foi a parte da soldadura com salpicos que ofereceu resistência à tração, sendo que a restante apenas se “desencaixou” da junta. Um outro aspeto relevante e que não aconteceu na amostra anterior, foi a fratura da amostra do titânio na zona da soldadura com penetração total.

Soldadura Al - Ti: amostra 7








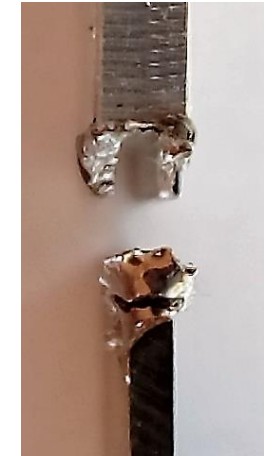

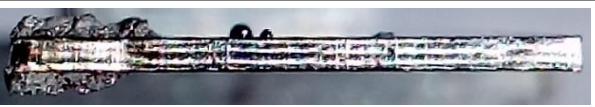
Tabela 34 - Resultados da amostra 7			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 35 - Resultados da amostra 7	
Alumínio	Titânio
	

Na amostra 7, representada nas Tabela 34 e Tabela 35, a potência voltou a ser diminuída, para 62%. Ao contrário da passagem anterior da potência de 65% para 63% onde houve uma grande diferença no sítio onde a soldadura se torna irregular, nesta amostra não houve praticamente diferença comparada com a anterior. A fusão do alumínio na parte inferior da amostra deu-se igualmente no fim do cordão. Também neste caso houve uma fratura do titânio na zona final do cordão de soldadura.

Soldadura Al - Ti: amostra 8





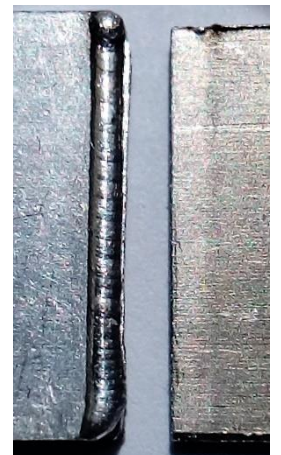

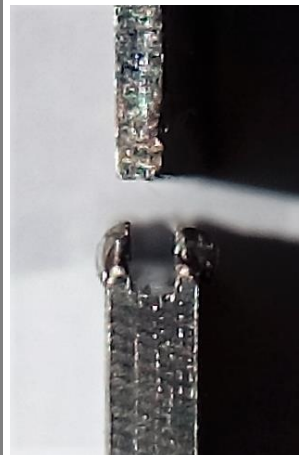
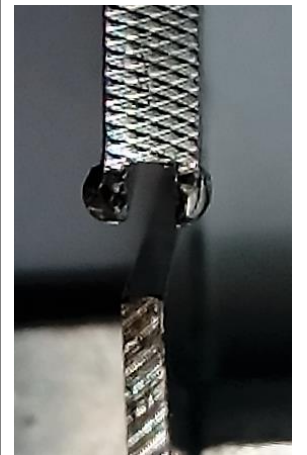

Tabela 36 - Resultados da amostra 8			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 37 - Resultados da amostra 8	
Alumínio	Titânio
	

Por fim, ao voltar a diminuir a potência, para 61%, desta vez conseguiu-se um cordão regular e sem salpicos, do início ao fim da soldadura (Tabela 36). Como não houve fusão do alumínio do lado oposto ao que é incidido pelo laser, pelo menos que fosse visível a olho nu, virou-se a peça ao contrário e tornou-se a soldar com os mesmos parâmetros, obtendo-se assim um cordão de soldadura bastante semelhante ao anterior, ambos com excelente aspeto visual.

Contudo, tal como se pode ver nas imagens da amostra após o ensaio de tração, houve muito pouca ou até mesmo nenhuma fusão do titânio e, conseqüentemente, não houve união de ambos os metais. O ensaio de tração nem chegou a acontecer, pois as amostras separaram-se quando se estava a posicioná-las nas amarras da máquina de ensaios de tração.

4.2.2.2 Soldadura no início do titânio

O segundo caso estudado da soldadura de alumínio e titânio foi com o feixe laser alinhado com o início da amostra de titânio. Foram soldadas três amostras, variando a potência com os valores 65%, 66% e 67%. Os restantes parâmetros foram mantidos constantes, com a largura de pulso com 9 ms, a sobreposição a 60% e o diâmetro do feixe laser com 0,8 mm.

Soldadura Al - Ti: amostra 9





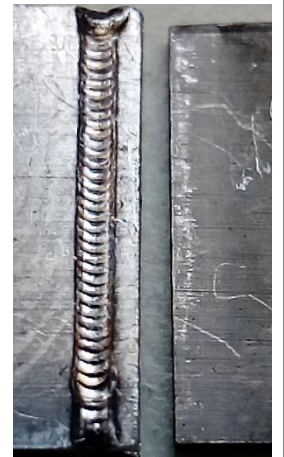





Tabela 38 - Resultados da amostra 9			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 39 - Resultados da amostra 9	
Alumínio	Titânio
	

Considerando que seria necessário mais energia para soldar as amostras, pois ao alinhar o feixe laser com a aresta do titânio metade incide no rasgo de alumínio que tem espessura de 0,5 mm e a outra metade incide na zona onde já tem a espessura total da amostra, 1,9 mm, usou-se o valor da potência mais elevado do caso anterior, 65%.

Como se pode ver na Tabela 38, obteve-se um cordão bastante uniforme, idêntico ao da amostra 8, não afetando a parte inferior da amostra. Deste modo, tornou-se a soldar as amostras com os mesmos parâmetros do lado oposto. Note-se que as imagens da primeira linha referentes à soldadura foram tiradas após a primeira soldadura. Nas imagens referentes ao ensaio de tração já se pode ver a segunda soldadura, que foi dada da parte inferior.

Após o ensaio de tração, verificou-se que a energia fornecida durante a soldadura não foi suficiente para fundir o titânio, não havendo, portanto, a mistura de metais desejada para se unirem. Na Tabela 39 vê-se que o titânio não sofreu alterações visíveis a olho nu.

Soldadura Al - Ti: amostra 10




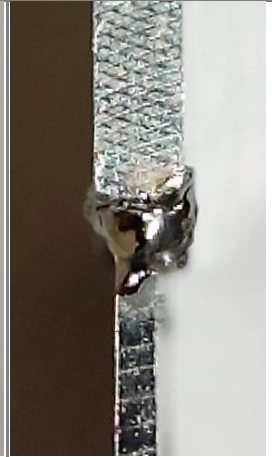


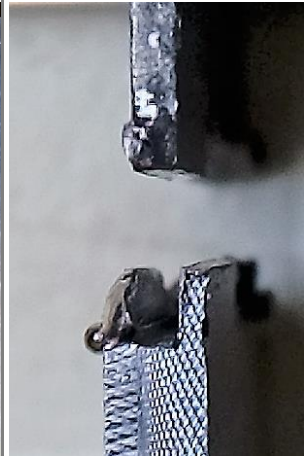
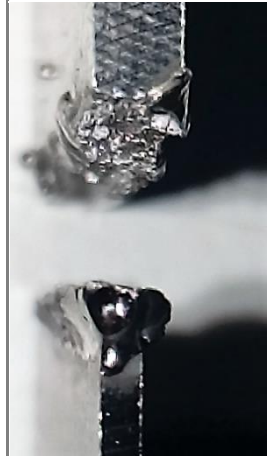


Tabela 40 - Resultados da amostra 10			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 41 - Resultados da amostra 10	
Alumínio	Titânio
	

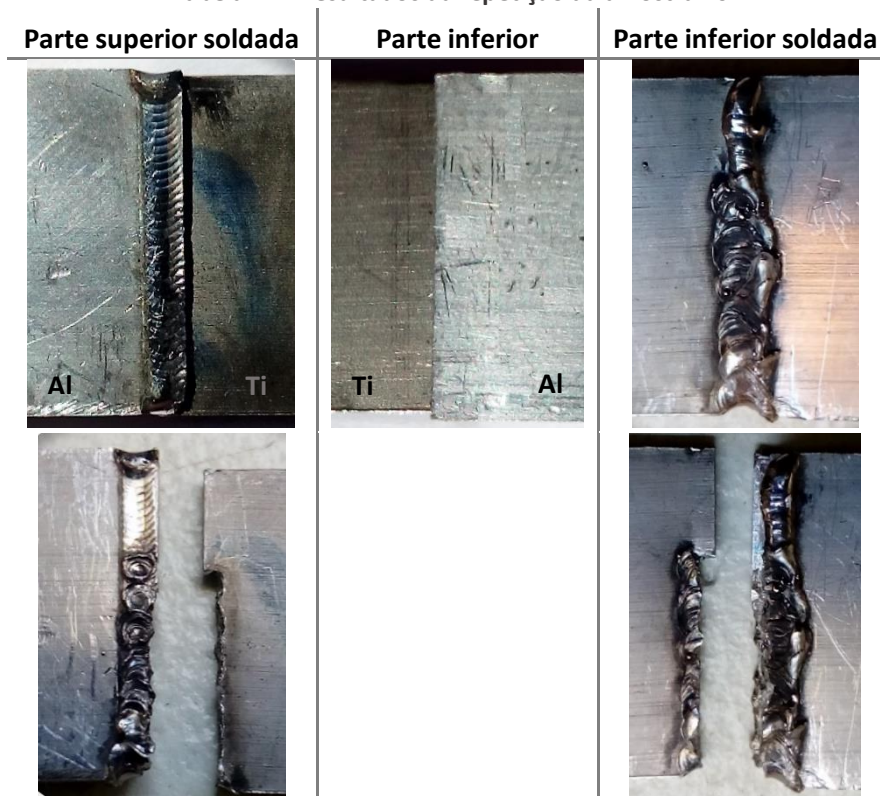
Para a amostra 10, apresentada na Tabela 40 e Tabela 41, aumentou-se a potência para 66%, visto que na amostra anterior não houve fusão do titânio. Apesar de se ter apenas aumentado um ponto percentual, o resultado da soldadura foi bastante diferente. Antes de se chegar a meio da amostra, o cordão passa de uniforme para irregular, tal como já aconteceu em casos anteriores, havendo fusão do titânio e do alumínio em ambos os lados.

Após o ensaio de tração, verifica-se essa mistura de metais, principalmente nas imagens da Tabela 41. Até aqui, este foi o caso onde houve maior alteração do titânio.

Tendo em conta a grande diferença de resultados de soldadura variando apenas um ponto percentual de potência, considerou-se sensato repetir o ensaio. Surpreendentemente, os resultados foram bastantes diferentes. A primeira soldadura originou um cordão integralmente regular, não havendo fusão do alumínio do lado oposto, tal como se pode ver em “Parte inferior” da Tabela 42. Sendo assim, foi-se soldar com os mesmos parâmetros esse lado oposto. Contudo, a soldadura já se tornou bastante irregular, indo afetar o lado oposto onde já havia um cordão de soldadura.

Uma explicação para esta diferença de resultados para os mesmos parâmetros é o facto de se estar a trabalhar com chapas de reduzida espessura e um pequeno desvio ter muita influência no resultado final, principalmente na parte do rasgo do alumínio, onde se tem, teoricamente, uma espessura de 0,50 mm. Apesar deste comportamento diferente, o efeito de rutura do titânio é idêntico nas duas amostras (Tabelas 40 e 42).

Tabela 42 - Resultados da repetição da amostra 10



Soldadura Al - Ti: amostra 11





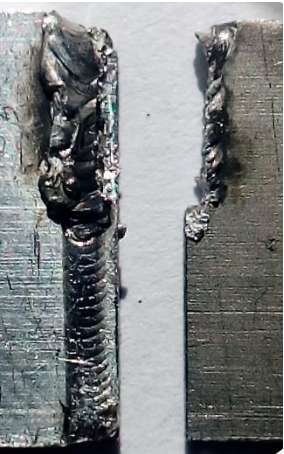
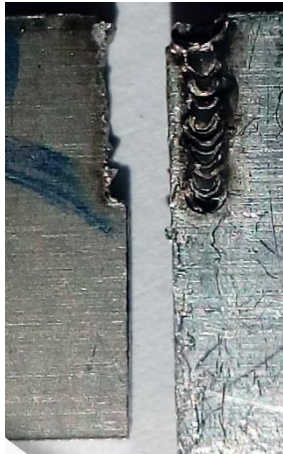
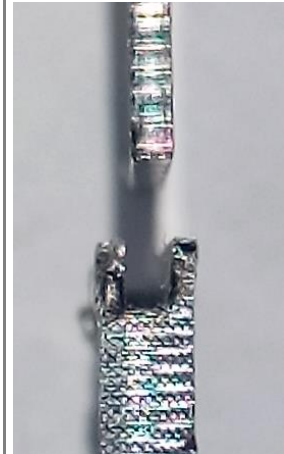



Tabela 43 - Resultados da amostra 11			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 44 - Resultados da amostra 11	
Alumínio	Titânio
	

Por último, tornou-se a aumentar a potência, para 67%. Tal como se pode observar na Tabela 43, o cordão de soldadura tornou-se irregular e com bastantes projeções de alumínio pouco depois de se chegar a meio da amostra, penetrando nesta área até ao lado oposto da amostra.

Apesar do valor da potência ser um ponto percentual maior do que a soldadura anterior (amostra 10), não há muita diferença nos resultados. Por um lado, e contrariamente ao que deveria acontecer, a soldadura da primeira amostra 10 parece ter sido mais energética que esta, a número 11, pois houve maior fusão de material e aconteceu mais cedo a mudança para uma soldadura irregular. Se se comparar as imagens da Tabela 41 e da Tabela 44, vê-se claramente a diferença em termos de fusão e mistura de metais. Por outro lado, a amostra 11 aparenta ter recebido mais energia do que a segunda amostra 10 (Tabela 42), pois nesta última houve do início ao fim um cordão regular de soldadura, fazendo mais sentido em termos de valores de potência.

4.2.2.3 Soldadura no início do alumínio

O terceiro caso estudado da soldadura de alumínio e titânio foi com o feixe laser alinhado com o início da amostra de alumínio. Foram soldadas três amostras, variando a potência e o diâmetro do feixe laser, com os valores 60% e 58%, e 0,8 mm e 1,2 mm, respetivamente. Os restantes parâmetros foram mantidos constantes, com a largura de pulso com 9 ms e a sobreposição a 60%.

Soldadura Al - Ti: amostra 12






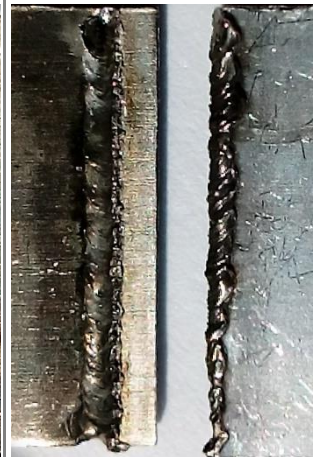




Tabela 45 - Resultados da amostra 12			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 46 - Resultados da amostra 12	
Alumínio	Titânio
	

Para este caso, onde se alinhou o feixe laser com a aresta do alumínio, considerou-se que não seria necessária tanta energia comparado com as soldaduras anteriores, visto que metade da área do feixe laser incide diretamente no titânio que tem espessura de 0,9 mm e a outra metade na “perna” do rasgo de alumínio, com 0,5 mm de espessura. Deste modo, optou-se por uma potência de 60%.

O resultado foi um cordão de soldadura algo regular (Tabela 45) e onde houve fusão do alumínio e do titânio do início ao fim das amostras de forma mais ou menos moderada, isto é, apesar de haver bastantes salpicos, não foi tão irregular como em casos anteriores. Contudo, após o ensaio de tração, verificou-se de forma mais clara um abatimento da amostra do titânio na zona do cordão, provocado possivelmente pelo excesso de potência, originando salpicos e evaporação de material.

Soldadura Al - Ti: amostra 13









Tabela 47 - Resultados da amostra 13			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 48 - Resultados da amostra 13	
Alumínio	Titânio
	

Para a amostra 13, apresentada na Tabela 47 e Tabela 48, manteve-se a potência da anterior, 60%, e aumentou-se o diâmetro do feixe laser de 0,8 mm para 1,2 mm.

Na amostra anterior a esta, a número 12, houve demasiados salpicos causados pelo excesso de penetração e originando, consequentemente, um abatimento da junta. Os parâmetros que influenciam a penetração são a energia e o diâmetro do feixe laser, sendo que um aumento de energia aumenta a penetração e um aumento do diâmetro diminui a penetração. Sendo assim, resolveu-se manter a potência e aumentar o diâmetro do feixe laser, de maneira a diminuir a penetração e ao mesmo tempo aumentar a área de incidência do laser nas amostras, procurando aumentar a mistura de metais durante a sua fusão.

Tal como se pode ver nas imagens, conseguiu-se impedir a formação de salpicos, conseguindo-se ao mesmo tempo um bom cordão de soldadura. Também se conseguiu a diminuição do abatimento do titânio que tinha acontecido na amostra anterior.

Soldadura Al - Ti: amostra 14









Tabela 49 - Resultados da amostra 14			
Parte superior	Parte inferior	Parte lateral início	Parte lateral fim
			
			

Tabela 50 - Resultados da amostra 14	
Alumínio	Titânio
	

Procurando otimizar a soldadura anterior em termos de energia, experimentou-se diminuir a potência em um ponto percentual, mantendo o diâmetro igual a 1,2 mm. O resultado está exposto na Tabela 49 e Tabela 50. Tal como se pode observar, não há muita diferença em termos de aspeto do cordão de soldadura. A pequena diferença está na parte inferior das amostras, onde a fusão do material começou ligeiramente mais tarde.

4.2.2.4 Valores máximos de força

Na Figura 65 encontram-se representados os valores máximos de força obtidos nos ensaios de tração de cada provete. Os três casos de soldadura, soldadura a meio da interseção, soldadura alinhada com a aresta do titânio e soldadura alinhada com a aresta do alumínio, estão representados por cores diferentes, sendo esta a ordem da esquerda para a direita.

O valor da amostra 8 de 10 N é meramente indicativo, pois apesar de se ter separado com um simples toque, estava unido.

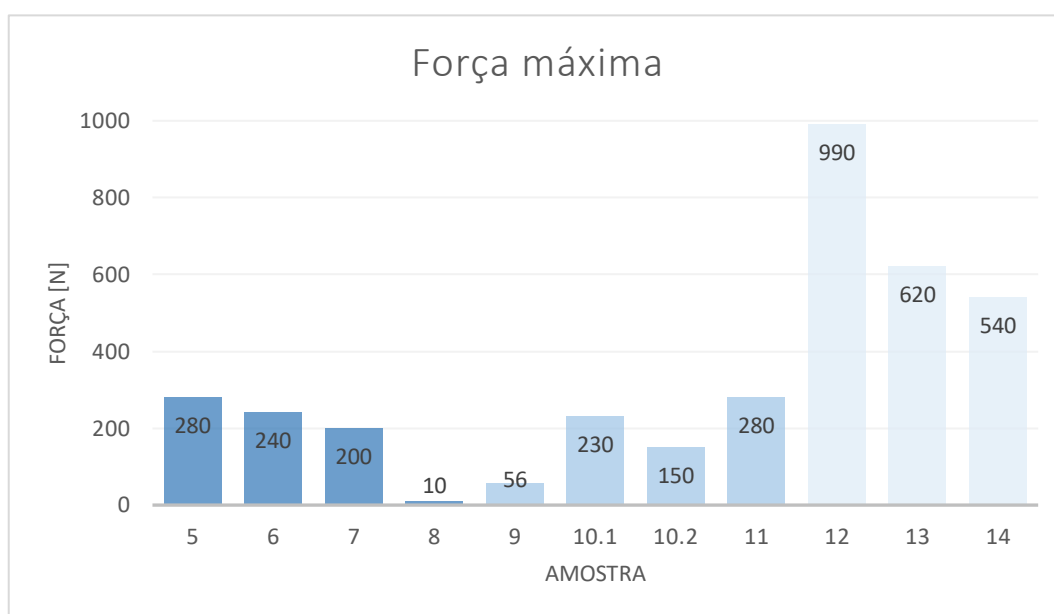


Figura 65 - Valores das forças máximas obtidas nos ensaios de tração Al - Ti

Tal como se pode observar, há uma enorme diferença entre o caso da soldadura dada pela aresta da amostra de alumínio e os restantes casos. De notar que os dois primeiros casos foram os que consumiram mais energia, apesar de terem obtido os piores resultados em termos de força máxima de tração.

O passo seguinte foi repetir a soldadura e o ensaio de tração para o melhor de cada caso, ou seja, para as amostras 5, 11 e 12 e avaliar a resistência mecânica da junta soldada.

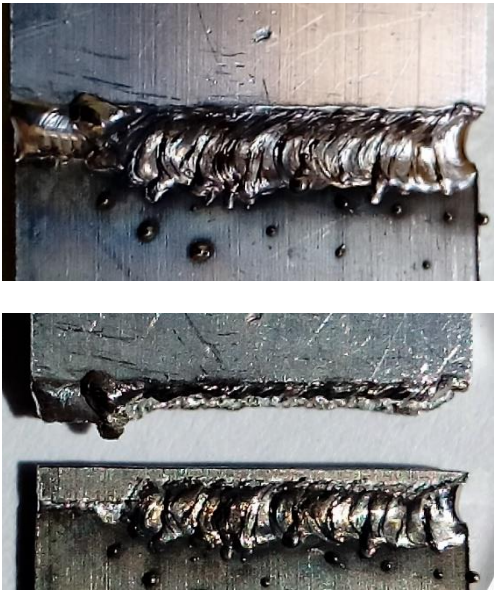
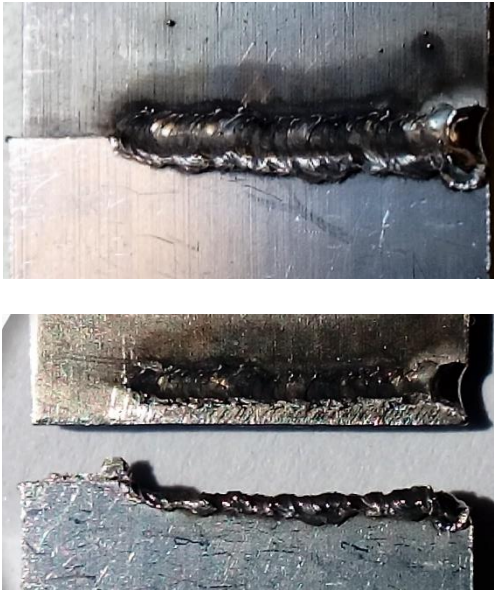
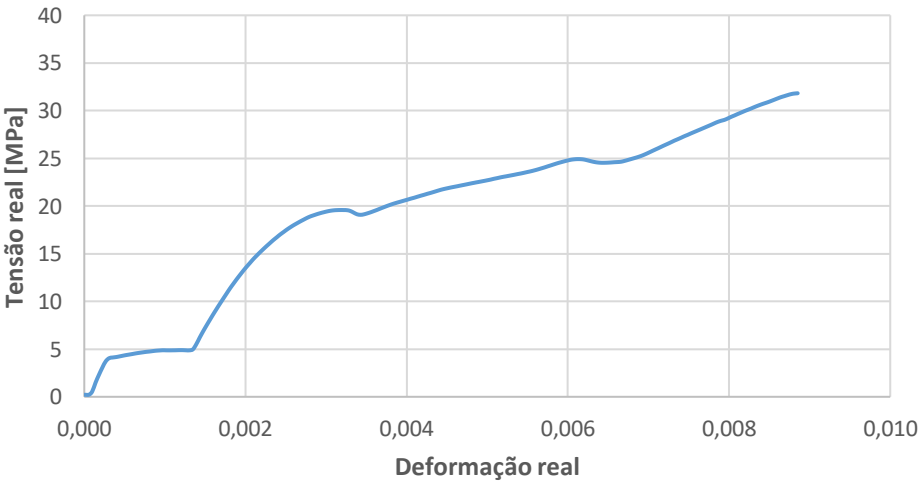
4.2.3 Verificação dos melhores resultados

Após os ensaios preliminares, selecionou-se as melhores amostras de cada caso para se repetir o processo de soldadura e o ensaio de tração. As imagens estão expostas de maneira a que o feixe laser incida da esquerda para a direita.

4.2.3.1 Amostra 5

Na Tabela 51 encontram-se expostos os resultados do ensaio de tração da amostra 5 repetida, do caso da soldadura dada a meio da interseção da junta. É de salientar que, quer o aspeto visual quer a força máxima à tração, são muito semelhantes aos observados na primeira amostra 5.

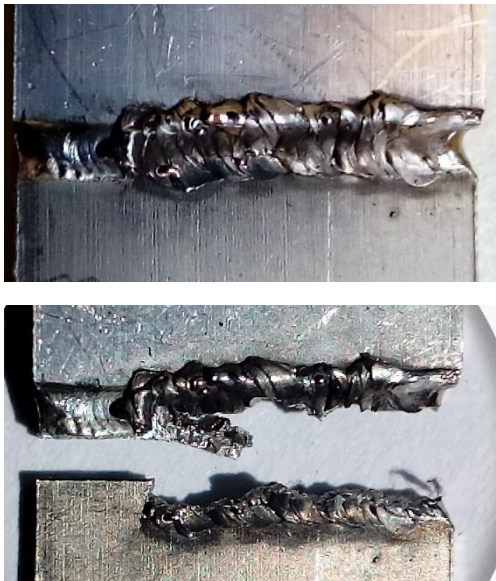
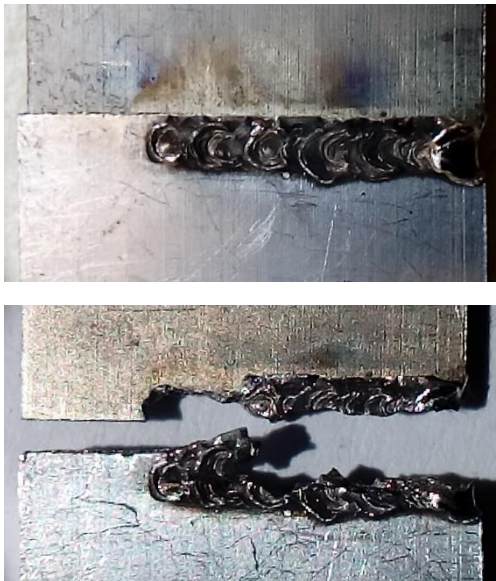
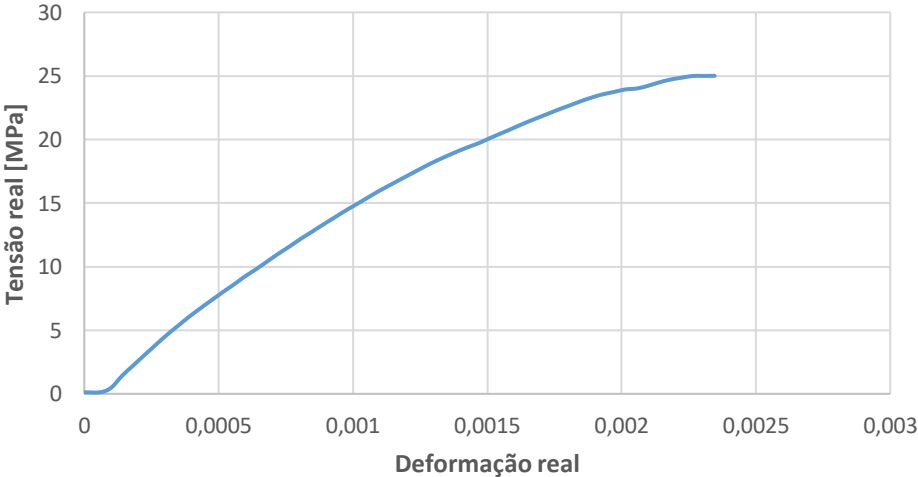
Tabela 51 - Resultados do ensaio de tração da amostra 5

Amostra 5	
Parte superior	Parte inferior
	
	
σ_{\max} [MPa] (real)	ϵ_{\max} [%] (real)
31	0,89

4.2.3.2 Amostra 11

Na Tabela 52 encontram-se expostos os resultados do ensaio de tração da amostra 11 repetida, do caso da soldadura alinhada pela aresta da amostra de titânio. De forma idêntica ao sucedido no teste inicial da amostra tipo 11, também agora há rutura do titânio a uma tensão muito baixa, denunciando que se deu a sua fragilização provavelmente por aquecimento excessivo.

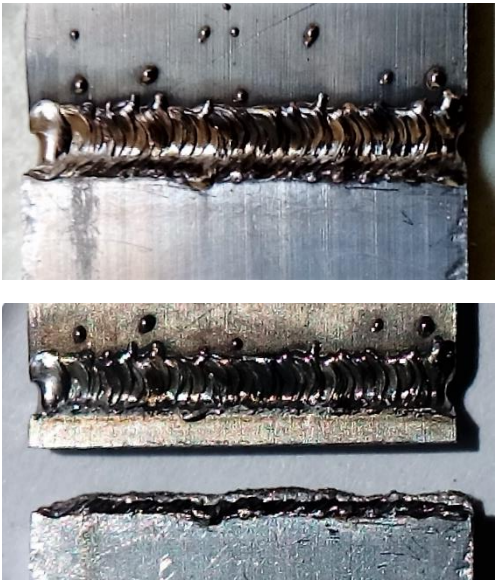
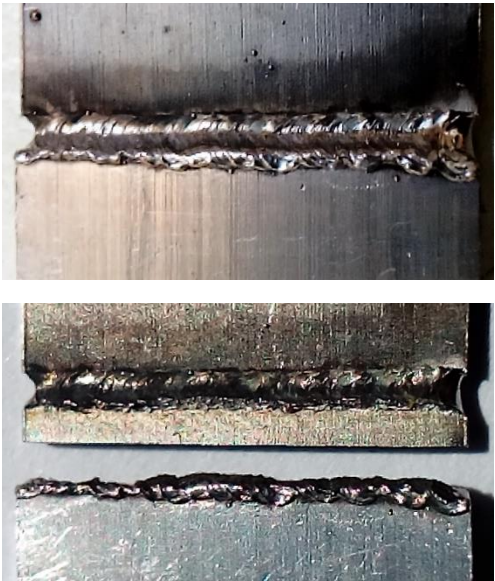
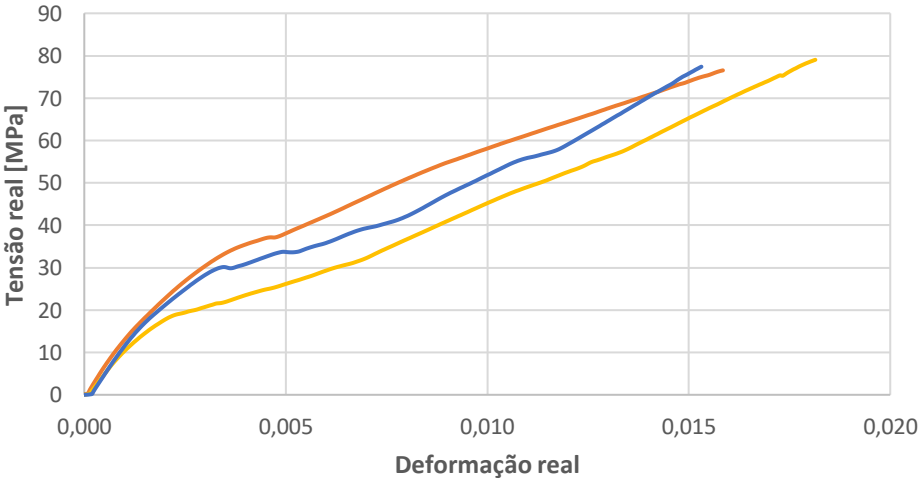
Tabela 52 - Resultados do ensaio de tração da amostra 11

Amostra 11	
<p>Vista superior</p> 	<p>Vista inferior</p> 
	
<p>σ_{\max} [MPa] (real)</p>	<p>ϵ_{\max} [%] (real)</p>
<p>25</p>	<p>0,23</p>

4.2.3.3 Amostra 12

Na Tabela 53 encontram-se expostos os resultados do ensaio de tração da amostra 12 em repetição, do caso da soldadura alinhada pela aresta da amostra de alumínio. Sendo este o melhor caso, repetiram-se os ensaios três vezes, de maneira a se obter resultados mais precisos.

Tabela 53 - Resultados do ensaio de tração da amostra 12

Amostra 12	
Parte superior	Parte inferior
	
	
σ_{\max} [MPa] (real)	ϵ_{\max} [%] (real)
78	1,64

O melhor caso da soldadura do alumínio e titânio, isto é, a amostra que obteve maior resistência à tração, foi com o feixe laser alinhado com a aresta do alumínio, ou seja, onde a incidência se deu diretamente tanto no alumínio como no titânio. Contudo a média dos valores obtidos, 78 MPa, está muito aquém da tensão máxima do alumínio, 222 MPa.

Esta tensão máxima da liga de alumínio AA6060, 222 MPa, corresponde ao tratamento térmico T6. Porém, durante a soldadura laser o material é aquecido e arrefecido de forma descontrolada, o que faz com que o tratamento térmico seja perdido, provocando assim uma perda das qualidades mecânicas [42], [43]. Deste modo, o alumínio pode passar a ter uma resistência à tração aproximadamente igual à liga sem tratamento, cerca de 116 MPa. Este seria, então, o valor máximo que se poderia obter de resistência à tração da união soldada de AA6060-T6 com Ti-6Al-4V, podendo-se assim dizer que a média dos melhores valores de tensão máxima obtidos experimentalmente, 78 MPa, não está muito distante deste.

5 Conclusões e trabalhos futuros

O presente trabalho estudou, experimentalmente, a soldadura laser de dois pares de metais dissimilares, sendo eles o aço DP1000 com o aço DP600 e a liga de alumínio AA6060-T6 com a liga de titânio Ti-6Al-4V.

Os aços foram soldados topo a topo com amostras de 0,8 mm de espessura, enquanto que o alumínio e o titânio foram soldados numa junta de sobreposição dupla, com amostras de 1,9 mm e 0,9 mm, respetivamente. Para tal, usou-se o equipamento de soldadura laser Nd:YAG SISMA SWA300.

Os ensaios de tração permitiram verificar a viabilidade das juntas soldadas. No caso dos aços *dual-phase*, foi também usado o *software* ARAMIS que permitiu identificar a evolução da deformação em várias zonas dos provetes, de modo a averiguar a influência da soldadura. Para o caso do alumínio - titânio, os ensaios de tração permitiram avaliar qual a melhor maneira de soldar os materiais, tendo sido variado o local da incidência do feixe laser.

Com os resultados obtidos, esta investigação permite concluir o seguinte:

- I. A proteção gasosa tem bastante influência no aspeto visual do cordão de soldadura. De facto, com a proteção gasosa adequada no aço DP, é possível obter um cordão com excelente aspeto visual e brilho metálico, tanto pela frente como pelo lado da raiz, enquanto que na ausência do gás se dá a oxidação de toda a área da amostra que atingiu a mais alta temperatura.
- II. A utilização de uma caixa de maneira a se formar uma atmosfera rica em gás mostrou ser bastante eficaz em comparação à proteção por escoamento através de tubos. Para além da melhoria significativa da qualidade visual do cordão de soldadura, há uma redução de 80% do caudal de gás usado.
- III. A penetração da soldadura é diretamente proporcional à potência do feixe laser e à duração do pulso. Contudo, a penetração não é constante ao longo do cordão. À medida que o material vai sendo soldado, vai também aquecendo mais, tornando-o mais “macio” e, deste modo, facilitando o processo de soldadura, permitindo maiores penetrações.
- IV. Em relação aos aços *dual-phase*, os parâmetros seleccionados cumprem os requisitos funcionais, uma vez que quando tracionados, os provetes não partem pelo cordão de soldadura. De facto, partiram sempre fora da zona termicamente afetada, indiciando

que a soldadura alterou termicamente as características mecânicas do aço, melhorando a sua resistência. Além disso, os provetes apresentam uma excelente qualidade visual no cordão, nomeadamente a ausência de salpicos, mordeduras e um abatimento de cordão praticamente inexistente.

- V. Parece ser possível soldar alumínio e titânio e criar um composto da mistura de ambos os materiais. Contudo, requer-se mais investigação nesta área de modo a se obter melhores propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à tração, pois apesar de se ter conseguido uma união soldada com alguma resistência mecânica, os valores de tensão ficaram um pouco abaixo da resistência do material base menos resistente, o alumínio.
- VI. Os melhores casos de ligação entre alumínio e titânio ocorreram onde houveram soldaduras mais energéticas, isto é, onde houve fusão de material, tanto de alumínio como de titânio em toda a espessura do provete, mas também bastantes salpicos e a formação de um cordão irregular. O melhor caso, em termos de resistência mecânica, foi quando o feixe laser incidiu diretamente no alumínio e no titânio, estando metade do diâmetro do feixe em cada material.

Apesar do objetivo principal ter sido cumprido, seria interessante explorar melhor alguns aspetos para complementar o presente estudo. Sugere-se, então, o seguinte trabalho futuro:

- I. Efetuar a soldadura do alumínio com titânio com metal de adição com o intuito de melhorar a soldabilidade do alumínio. De facto, sabe-se que a liga AA6060 experimentada, devido ao seu baixo teor de silício, apresenta uma grande tendência para a fissuração a quente.
- II. Realizar análises da microestrutura das amostras soldadas no sentido de melhor explicar o seu comportamento mecânico, nomeadamente a resistência à tração.

Bibliografia

- [1] W. Messler Robert, «Joining of metals, alloys, and intermetallics», *Elsevier*, 2004.
- [2] S. Y. Chang, L. C. Tsao, Y. H. Lei, S. M. Mao, e C. H. Huang, «Brazing of 6061 aluminum alloy/Ti-6Al-4V using Al-Si-Cu-Ge filler metals», *J. Mater. Process. Technol.*, 2012.
- [3] J. Yang, Y. Li, H. Zhang, W. Guo, D. Weckman, e N. Zhou, «Dissimilar Laser Welding/Brazing of 5754 Aluminum Alloy to DP 980 Steel: Mechanical Properties and Interfacial Microstructure», *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 2015.
- [4] G. Casalino, P. Guglielmi, V. D. Lorusso, M. Mortello, P. Peyre, e D. Sorgente, «Laser offset welding of AZ31B magnesium alloy to 316 stainless steel», *J. Mater. Process. Technol.*, 2017.
- [5] C. Walsh, «Laser welding - Literature review», *Mater. Sci. Metall. Dep. Univ. Cambridge*, 2002.
- [6] P. Maia e J. Vilas, «Otimização de Parâmetros em Soldadura Laser Quantal SA», *FEUP*, 2013.
- [7] D. F. Oliveira, «Parâmetros da soldadura LASER pulsado de Nd:YAG em aços avançados de alta resistência», *Univ. Aveiro*, 2015.
- [8] J. P. Paiva, «Soldadura laser do aço dual-phase 1000», *Univ. Aveiro*, 2016.
- [9] «History of Lasers - WorldofLasers.com». [Em linha]. Disponível em: <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>. [Acedido: 03-Mai-2017].
- [10] S. N. Joffe e Y. Oguro, *Advances in Nd:YAG Laser Surgery*. Springer, 1988.
- [11] T. Werkzeugmaschinen GmbH + Co.KG, «Laser machining Solid-state lasers», *Tech. Doc. Dep. TRUMPF*, 2007.
- [12] Unitek Miyachi Corporation, «Nd : YAG Laser Welding Guide», 2003.
- [13] N. Dahotre e S. Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Springer, 2008.
- [14] «Types of Lasers - WorldOfLasers». [Em linha]. Disponível em: <http://www.worldoflasers.com/lasertypes.htm>. Acedido: 3-Maio-2017.
- [15] A. Bastos, «Apontamentos de Tecnologia de Processos de Ligação», *Univ. Aveiro*, 2014.
- [16] V. Chiaverini, «Outros processos de conformação mecânica», *Tecnol. Mecânica vol. III Process. Fabr. e Trat.*, 1986.
- [17] Z. Sloderbach e J. Pajak, «Determination of ranges of components of heat affected zone including changes of structure», *Arch. Metall. Mater.*, 2015.
- [18] A. J. Kulazi, «Comportamento À Fadiga Do Aço DP600», *Inst. Super. Técnico Lisboa*, 2007.
- [19] A. A. Gorni, «Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas», *Corte Conform. Met.*, 2008.
- [20] C. M. Tamarelli, «The evolving use of advance high-strength steel for automotive applications», *Steel Mark. Dev. Inst.*, 2011.
- [21] Y. Granbom, «Structure and mechanical properties of dual phase steels – An experimental and theoretical analysis», *Sch. Ind. Enginnering Manag. - Div. Mech. Metall.*, 2010.
- [22] «The unique characteristics of dual-phase steels». [Em linha]. Disponível em: <http://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/the-unique-characteristics-of-dual-phase-steels>. [Acedido: 03-Mai-2017].
- [23] «Dual Phase (DP) Steel». [Em linha]. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/>. [Acedido: 03-Mai-2017].
- [24] «World Aluminium - the website of the International Aluminium Institute». [Em linha]. Disponível em: <http://www.world-aluminium.org>. [Acedido: 04-Mai-2017].
- [25] A. Campos, «Modelação e Análise Numérica do Comportamento Mecânico e Térmico de Ligas de Alumínio», *Univ. Aveiro*, 2005.
- [26] M. Carvalhosa, «Heterogeneidades em Ligas de Alumínio da Série», *Univ. Aveiro*, 2014.
- [27] F. M. F. Nascimento, «Processamento por Fricção Linear - Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6», *Inst. Super. Técnico Lisboa*, 2007.
- [28] J. Pereira, «Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na

- resistência à corrosão em estruturas navais soldadas», *Fac. Ciências e Tecnol. - Univ. Nov. Lisboa*, 2010.
- [29] S. K. Jha, D. Balakumar, e R. Paluchamy, «Experimental Analysis of Mechanical Properties on AA 6060 and 6061 Aluminum Alloys», *J. Eng. Res. Appl.*, 2015.
- [30] M. Beusink, «Measurements and simulations on the properties of aluminium alloy», 2011.
- [31] M. Met, «Aplicação de titânio e suas ligas na construção», *Laboratório Nac. Eng. Civ.*, 2008.
- [32] G. P. S. das Neves, «Simulação numérica por elementos finitos da maquinagem de titânio e suas ligas», *Univ. Aveiro*, 2010.
- [33] P. Soares, «Estudo da maquinabilidade das ligas Ti-6Al-4V e Co-28Cr-6Mo na fresagem de dispositivos biomédicos», *Univ. Aveiro*, 2015.
- [34] Arcam, «Ti6Al4V Titanium Alloy», *Arcam SBM Syst.*, 2014.
- [35] H. S. De Oliveira e D. a. P. Reis, «Caracterização mecânica e microestrutural da liga Ti-6Al-4V após tratamento superficial com laser pulsado Nd: YAG», *Inst. Tecnológico Aeronáutica*, 2009.
- [36] G. D. Revankar, R. Shetty, S. S. Rao, e V. N. Gaitonde, «Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process», *J. Mater. Res. Technol.*, 2016.
- [37] Sisma, «Swa 150 Swa 300», *Sisma*, 2014.
- [38] W. Ank De Moraes e H. C. Borges, «Adequacy on Practice of New Process for Bending and Cutting To Optimize Steel Sheet Performance», *Tecnol. Met. Mater. Miner.*, 2010.
- [39] I. Standard, «ISO 6892-1:2009 Metallic materials - Tensile testing, - Part 1: Method of test at room temperature.», *Met. Mater.*, 2009.
- [40] «ARAMIS - 3D Motion and Deformation Sensor». [Em linha]. Disponível em: <http://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>. [Acedido: 20-Abr-2017].
- [41] S. Fundimol, «ALUMINIUMS Alloys: Aluminium - Magnesium - Silicon 6060: Chemical composition and physical properties».
- [42] «Aluminium Technical Information - Australian Aluminium Council LTD». [Em linha]. Disponível em: <http://aluminium.org.au/FAQRetrieve.aspx?ID=43868>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [43] «6061 Aluminium». [Em linha]. Disponível em: <https://www.sapagroup.com/en-US/locations/north-america/united-states/local-content/extruded-aluminum-products/aluminum-extrusion-alloys/6061-aluminum/>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [44] «Retrobituaries: Theodore Maiman, Inventor of the Laser». [Em linha]. Disponível em: <http://mentalfloss.com/article/50562/retrobituaries-theodore-maiman-inventor-laser>. [Acedido: 10-Mai-2017].
- [45] «LaserFest | The First Ruby Laser». [Em linha]. Disponível em: <http://www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm>. [Acedido: 10-Mai-2017].
- [46] «Free electron lasers and conventional laser». [Em linha]. Disponível em: http://photonscience.desy.de/facilities/flash/the_free_electron_laser/how_it_works/lasers/index_eng.html. [Acedido: 11-Mai-2017].
- [47] «átomo 3d - pesquisa google». [Em linha]. Disponível em: http://1.bp.blogspot.com/-lcqyJnml_dg/UgB3J8u1DWI/AAAAAAAAACA/3F6BeVa0hxQ/s1600/modelo-atomico.jpg. [Acedido: 11-Mai-2017].
- [48] W. K, *Pressure welding methods*. Welding Precesses Handbook.
- [49] «AHSS Diagram». [Em linha]. Disponível em: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/AHSSDiagram_WorldAutoSteel-copy.png. [Acedido: 20-Mar-2017].